

CONTENT

CESARE SPOSITO, FRANCESCA SCALISI (EDITORIAL)	<i>Modulo e modularità – Declinazioni e scale applicative nella contemporaneità</i> Module and modularity – Variations and application scales in contemporary times	2
CESARE SPOSITO, GIUSEPPE DE GIOVANNI	<i>Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera</i> Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere	12
MARK DEKAY, STEFANO TORNIERI	<i>Schemi per la progettazione esperienziale – Combinare pensiero modulare e teoria integrale</i> Experiential design schemas – Combining modular thinking with integral theory	40
JORGE GARCIA VALLDECABRES, DANIELA BESANA	<i>Architetture minime per il paesaggio – Il modulo come strumento per la sostenibilità</i> Minimal architectures for landscape – The module as a tool for sustainability	50
CARLA BRISOTTO, JEFF CARNEY, INA MACAIONE ALESSANDRO RAFFA	<i>Cambiamenti climatici nei paesaggi di bonifica – Adattamento tra modulo e modularità</i> Climate change in reclamation landscapes – Adaptation between module and modularity	62
ANNA-MARIA VISILLA	<i>I giardini modulari di James C. Rose – La sperimentazione per il Ladies' Home Journal (1946)</i> Modular gardens by James C. Rose – A 1946 experiment for Ladies' Home Journal	71
SANTIAGO GOMES	<i>Tipologia, topografia e tettonica – Categorie e modelli per il progetto urbano</i> Typology, topography and tectonics – Categories and models for the urban project	84
PAOLA SCALA	<i>Non solo pelle – Modulo oggetto e modulo misura nella composizione dell'involucro architettonico</i> Not just skin – Object module and measure module in the composition of the architectural envelope	96
CLAUDIA PIRINA, GIOVANNI COMI, ANNA FRANGIPANE	<i>Assemblaggio e dis-assemblaggio – Il modulo come elemento compositivo per una 'nuova' sostenibilità – Il caso spagnolo</i> Assembly and disassembly – The module as a compositional element for a 'new' sustainability – The Spanish case	106
LUCA VELO, ALBERTO CERVESATO	<i>Moduli compositivi – Prospettive per antichi patrimoni verso la transizione ecologica</i> Project modules – Prospects for ancient heritage towards ecological transition	116
YONA CATRINA SCHREYER	<i>Oltre l'arrivo – Potenzialità e criticità della modularità nei rifugi e negli alloggi per gli sfollati</i> Beyond arrival – On the potential and shortcomings of modularity in shelter and housing for the displaced	126
VALENTINO MANNI, LUCA SAVERIO VALZANO	<i>Modularità e architettura adattiva – Una strategia per la gestione di sistemi d'involucro complessi</i> Modularity and adaptive architecture – A strategy for managing complex envelope systems	134
OSCAR EUGENIO BELLINI, MARIANNA ARCIERI MARIA TERESA GULLACE	<i>Sistemi abitativi off-site – Soluzioni speditive per l'abitare da studenti</i> Off-site modular housing systems – Expeditious solutions for student residence	152
NICCOLÒ DI VIRGILIO	<i>Fare molto con poco – Un'architettura modulare, a partire da Walter Segal</i> Making a lot with little – Modular architecture, starting with Walter Segal	164
MICKEAL MILOCCO BORLINI, AMBRA PECILE CHRISTINA CONTI	<i>Oltre il corpo – Ripensare il modulo per favorire l'inclusione sociale</i> Beyond the body – Rethinking the architectural module to promote social inclusion	174
RENATA MORBIDUCCI, SALVATORE POLVERINO CATERINA BATTAGLIA	<i>Stampa 4D per componenti costruttivi modulari – Applicazioni e principali sviluppi</i> 4D printing for modular construction components – Applications and main developments	182
ADRIANA GHERSI, SILVIA PERICU, FEDERICA DELPRINO STEFANO MELLI	<i>Misurare i paesaggi – Un ritmo per la narrazione attraverso luoghi e itinerari condivisi</i> Measuring landscapes – A storytelling rhythm through shared places and itineraries	194
FABRIZIO TUCCI, PAOLA ALTAMURA MARIA MICHAELA PANI	<i>Modulare le dinamiche urbane in chiave climatica – Spazi intermedi e neutralità climatica</i> Modulating urban dynamics from a climate perspective – In-between spaces and climate neutrality	204
ADRIANO MAGLIOCCO, GABRIELE ONETO	<i>Configurazioni spaziali nell'analisi ambientale urbana – Il contributo dell'isola di calore</i> Spatial configurations in urban environmental analysis – The role of the heat island effect	216
RICCARDO POLLO, ELISA BIOLCHINI VALERIA SCOGNAMIGLIO	<i>Progettare le Case della Comunità – Applicazione dell'approccio modulare a un modello innovativo di presidio</i> Designing Community Houses – Application of the modular approach to an innovative model of facility	224
TERESA VILLANI, FEDERICA ROMAGNOLI	<i>Modularità e personalizzazione per le cure domiciliari – Configurazione e analisi multicriteri degli arredi</i> Modularity and customisation for home care – Configuration and multicriteria analysis of furnishings	236
ROSA ROMANO, ELEONORA DI MONTE	<i>Moduli nearly Zero Energy – Modelli abitativi a basso impatto ambientale per la città del futuro</i> nearly Zero Energy Modules – Low-impact modular housing models for the city of the future	250
DAVID CORREA, FABIO BIANCONI, MARCO FILIPPUCCI GIULIA PELLICCIA	<i>Pattern modulari nel design igroscopico con stampa 4D – Forma e programmazione del materiale</i> Modular patterns in hygroscopic 4D printing design – Form and programming of the material	264
LUCIA PIETRONI, ALESSANDRO DI STEFANO DANIELE GALLOPO	<i>Il design modulare verso l'economia circolare – Dal 'fare per disfare' al 'fare per rifare'</i> Modular design towards the circular economy – From 'making to unmake' to 'making to remake'	274
PAOLO TAMBORRINI, SOFIA CRETAIO	<i>Relazioni modulari negli spazi di lavoro – Approcci data-driven per progettarne il futuro</i> Modular relations in work environments – Data-driven approaches to design their future	284
CARLA LANGELLA, SALVATORE CARLEO MARIANNA DE LUCA	<i>Modularità come strategia per il design medicale</i> Modularity as a strategy for medical design	294
ILARIA FABBRI	<i>Smart Hubs – Una rete di oggetti urbani multifunzionali a supporto della micromobilità a Ferrara</i> Smart Hubs – A network of multifunctional urban objects to support micromobility in Ferrara	304
KATTA GASPARINI	<i>Design litico e manifattura additiva – Un connubio possibile per l'economia circolare</i> Lithic design and additive manufacturing – A feasible partnership for the circular economy	316
DARIA CASCIANI	<i>Moda e design modulare – Modularità come strategia di design per la sostenibilità</i> Fashion and modular design – Modularity as a design strategy for sustainability	323

14

International Journal of Architecture Art and Design

14 | 2023

MODULO E MODULARITÀ | MODULE AND MODULARITY
AGATHÓN

MODULO E MODULARITÀ
DECLINAZIONI E SCALE APPLICATIVE
NELLA CONTEMPORANEITÀ

MODULE AND MODULARITY
VARIATIONS AND APPLICATION SCALES
IN CONTEMPORARY TIMES

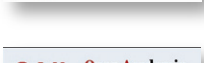
14
2023

AGATHÓN

International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

AGATHÓN is indexed on



Promoter
DEMETRA Ce.Ri.MED.
Centro Documentazione e Ricerca Euro-Mediterranea
Euro-Mediterranean Documentation & Research Center

Publisher
Palermo University Press
Via Serradifalco n. 78 | 90145 Palermo (ITA)
E-mail: info@newdigitalfrontiers.com

Il vol. 14 è stato stampato nel Dicembre 2023 da
Issue 14 was printed in December 2023 by
FOTOGRAF s.r.l.
viale delle Alpi n. 59 | 90144 Palermo (ITA)

AGATHÓN è un marchio di proprietà di Cesare Sposito
AGATHÓN is a trademark owned by Cesare Sposito



Scientific Directors
GIUSEPPE DE GIOVANNI, CESARE SPOSITO (University of Palermo, Italy)

Managing Director
MICAELA MARIA SPOSITO

International Scientific Committee

ALFONSO ACOCCELLA (University of Ferrara, Italy), JOSE BALLESTEROS (Polytechnic University of Madrid, Spain), SALVATORE BARBA (University of Salerno, Italy), FRANÇOISE BLANC (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse, France), ROBERTO BOLOGNA (University of Firenze, Italy), TAREK BRIK (University of Tunis, Tunisia), TOR BROSTRÖM (Uppsala University, Sweden), JOSEP BURCH I RIUS (University of Girona, Spain), MAURIZIO CARTA (University of Palermo, Italy), ALICIA CASTILLO MENA (Complutense University of Madrid, Spain), PILAR CHIAS NAVARRO (Universidad de Alcalá, Spain), JORGE CRUZ PINTO (University of Lisbon, Portugal), MARIA ANTONIETTA ESPOSITO (University of Firenze, Italy), EMILIO FAROLDI (Polytechnic University of Milano, Italy), FRANCESCA FATTA ('Mediterranea' University of Reggio Calabria, Italy), FRANCISCO JAVIER GALLEGRO ROCA (University of Granada, Spain), PIERFRANCO GALLIANI (Polytechnic University of Milano, Italy), MARIA LUISA GERMANÀ (University of Palermo, Italy), VICENTE GUALLART (IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Spain), JAVIER GARCÍA-GUTIÉRREZ MOSTEIRO (Polytechnic University of Madrid, Spain), FAKHER KHARRAT (Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme, Tunisia), MOTOMI KAWAKAMI (Tama Art University, Japan), WALTER KLASZ (University of Art and Design Linz, Austria), PAOLO LA GRECA (University of Catania, Italy), INHEE LEE (Pusan National University, South Korea), MARIO LOSASSO ('Federico II' University of Napoli, Italy), MARIA TERESA LUCARELLI ('Mediterranea' University of Reggio Calabria, Italy), CRISTIANA MAZZONI (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Belleville, France), RENATO TEOFILO GIUSEPPE MORGANTI (University of L'Aquila, Italy), STEFANO FRANCESCO MUSSO (University of Genova, Italy), OLIMPIA NIGLIO (University of Pavia, Italy), MARCO ROSARIO NOBILE (University of Palermo, Italy), PATRIZIA RANZO ('Luigi Vanvitelli' University of Napoli, Italy), LAURA RICCI ('Sapienza' University of Roma, Italy), MOSÈ RICCI (University of Trento, Italy), ANDREA ROLANDO (Polytechnic University of Milano, Italy), DOMINIQUE ROULLARD (National School of Architecture Paris Malaquais, France), ROBERTO PIETROFORTE (Worcester Polytechnic Institute, USA), CARMINE PISCOPO ('Federico II' University of Napoli, Italy), LUIGI SANSONE (Art Reviewer, Milano, Italy), ANDREA SCIASCIA (University of Palermo, Italy), FEDERICO SORIANO PELAEZ (Polytechnic University of Madrid, Spain), BENEDETTA SPADOLINI (University of Genova, Italy), CONRAD THAKE (University of Malta), FRANCESCO TOMASELLI (University of Palermo, Italy), MARIA CHIARA TORRICELLI (University of Firenze, Italy), FABRIZIO TUCCI ('Sapienza' University of Roma, Italy)

Editor-in-Chief

FRANCESCA SCALISI (DEMETRA Ce.Ri.Med., Italy)

Editorial Board

SILVIA BARBERO (Polytechnic University of Torino, Italy), CARMELINA BEVILACQUA ('Sapienza' University of Roma, Italy), MARIO BISSON (Polytechnic University of Milano, Italy), TIZIANA CAMPISI (University of Palermo, Italy), CHIARA CATALANO (ZHAW – School of Life Sciences and Facility Management, Switzerland), CLICE DE TOLEDO SANJAR MAZZILLI (University of São Paulo, Brazil), GIUSEPPE DI BENEDETTO (University of Palermo, Italy), ANA ESTEBAN-MALUENDA (Polytechnic University of Madrid, Spain), RAFFAELLA FAGNONI (IUAV, Italy), ANTONELLA FALZETTI ('Tor Vergata' University of Roma, Italy), ELISA MARIAROSARIA FARELLA (Bruno Kessler Foundation, Italy), RUBÉN GARCÍA RUBIO (Tulane University, USA), MANUEL GAUSA (University of Genova, Italy), PILAR CRISTINA IZQUIERDO GRACIA (Polytechnic University of Madrid, Spain), DANIEL IBAÑEZ (IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Spain), PEDRO ANTONIO JANEIRO (University of Lisbon, Portugal), MASSIMO LAURIA ('Mediterranea' University of Reggio Calabria, Italy), INA MACAIONE (University of Basilicata, Italy), FRANCESCO MAGGIO (University of Palermo, Italy), FERNANDO MORAL-ANDRÉS (Universidad Nebrija in Madrid, Spain), DAVID NESS (University of South Australia, Australia), ELODIE NOURRIGAT (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Montpellier, France), ELISABETTA PALUMBO (University of Bergamo, Italy), FRIDA PASHAKO (Epoka University of Tirana, Albania), JULIO CESAR PEREZ HERNANDEZ (University of Notre Dame du Lac, USA), PIER PAOLO PERRUCCIO (Polytechnic University of Torino, Italy), ROSA ROMANO (University of Firenze, Italy), DANIELE RONSIVALLE (University of Palermo, Italy), MONICA ROSSI-SCHWARZENBECK (Leipzig University of Applied Sciences, Germany), DARIO RUSSO (University of Palermo, Italy), MICHELE RUSSO ('Sapienza' University of Roma, Italy), MARICHELIA SEPE ('Sapienza' University of Roma, Italy), MARCO SOSA (Zayed University, United Arab Emirates), ZEILA TESORIERE (University of Palermo, Italy), ANTONELLA TROMBADORE (World Renewable Energy Network, UK), ALESSANDRO VALENTI (University of Genova, Italy), GASPARE MASSIMO VENTIMIGLIA (University of Palermo, Italy), ANTONELLA VIOLANO ('Luigi Vanvitelli' University of Campania, Italy), ALESSANDRA ZANELLI (Polytechnic University of Milano, Italy)

Assistant Editors

MARIA AZZALIN ('Mediterranea' University of Reggio Calabria, Italy)
GIORGIA TUCCI (University of Genova, Italy)

Graphic Designer

MICHELE BOSCARINO

Executive Graphic Designer

ANTONELLA CHIAZZA, PAOLA LA SCALA

Web Editor

PIETRO ARTALE

Il Journal è stampato con il contributo degli Autori che mantengono i diritti sull'opera originale senza restrizioni.

The Journal is published with fund of the Authors whom retain all rights to the original work without any restrictions.

AGATHÓN adotta il sistema di revisione del double-blind peer review con due Revisori che, in forma anonima, valutano l'articolo di uno o più Autori. I saggi nella sezione 'Focus' invece non sono soggetti al suddetto processo di revisione in quanto a firma di Autori invitati dal Direttore Scientifico nella qualità di esperti sul tema.

The AGATHÓN Journal adopts a double-blind peer review by two Referees under anonymous shape of the paper sent by one or more Authors. The essays on 'Focus' section are not subjected to double-blind peer review process because the Authors are invited by the Scientific Director as renowned experts in the subject.

AGATHÓN | International Journal of Architecture Art and Design

Issues for year: 2 | ISSN print: 2464-9309 | ISSN online: 2532-683X

Registrazione n. 12/2017 del 13/07/2017 presso la Cancelleria del Tribunale di Palermo

Registration number 12/2017 dated 13/07/2017, registered at the Palermo Court Registry

Editorial Office

c/o DEMETRA Ce.Ri.MED. | Via Filippo Cordova n. 103 | 90143 Palermo (ITA) | E-mail: redazione@agathon.it

AGATHÓN è stata inclusa nella lista ANVUR delle riviste di classe A per l'area 08 e i settori 08C1, 08D1, 08E1 e 08E2 a partire dal volume 1 del 2017.

AGATHÓN has been included in the Italian ANVUR list of Class A Journals for area 08 and sectors 08C1, 08D1, 08E1 and 08E2 starting from volume no. 1, June 2017.

Editoriale | Editorial**Cesare Sposito***Co-Scientific Director**Associate Professor of Architectural Tehcnology
University of Palermo***Arch. Ph.D. Francesca Scalisi***Editor-in-Chief**Assistant Professor of Design
University of Palermo***Modulo e modularità: declinazioni e scale applicative nella contemporaneità**
Module and modularity: variations and application scales in contemporary times

Modulo è segno, andamento lineare, forma geometrica o libera che si ripete all'interno di uno spazio determinato mantenendo inalterate le proprie proporzioni; è forma esemplare, norma e regola, numero, unità elementare e di misura; è concetto che esprime armonia, proporzione e qualità; è elemento catalizzatore di storia, cultura e memoria che rimanda, nell'ambito delle diverse discipline dell'urbanistica e del paesaggio, dell'architettura e dell'ingegneria, della rappresentazione, del design e dell'arte, tanto all'uomo (il Kanon di Policleto, l'homo vitruviano, il Modulor di Le Corbusier) quanto a suoi artefatti e concettualizzazioni (l'embater greco o l'imoscapo ancora vitruviano, la 'vesica piscis' o il 'modus ad triangulum' e 'ad quadratum' medievale e tutte le sue ulteriori e successive declinazioni). Modulo è misura delle cose e al tempo stesso sintesi delle relazioni che tali misure attivano (connessioni) oppure disattivano (separazioni); modulo è ritmo, interferenza, struttura, relazione, mutazione, standardizzazione ma è anche sintesi della specifica capacità umana di percepire, semplificare e rappresentare l'ambiente. Progettare è insieme misurare e mettere in relazione: 'contare e raccontare', come titolavano Carlo Bernardini e Tullio De Mauro (2003), attraverso il concetto di modulo che si presta a essere espressione di un atto (il contare o misurare) e al tempo stesso di una narrazione (il raccontare), entrambe arricchite e alimentate nella contemporaneità da un nuovo capitale semantico che, nel suo essere materiale e immateriale reale e digitale insieme, attiva nuove relazioni transdisciplinari e interdisciplinari coinvolgendo e contaminando tra loro le diverse scale del progetto.

Il modulo, nel suo essere misura olistica delle cose, misura e misurabilità, sembra condividere con la nuova contemporaneità l'idea di uno spazio 'diverso' – a qualsiasi scala – da ri-misurare e da ri-contare sia nella configurazione attuale (l'esistente) sia rispetto a ciò che potrà e/o dovrà essere (il nuovo). In quest'ottica, all'interno degli approcci progettuali e trasformativi dell'ambiente, sembra delinarsi una rinnovata e contemporanea espressione di modulo che si confronta in dinamica evoluzione con le inderogabili istanze di interoperabilità, virtualizzazione, decentralizzazione, sostenibilità e accessibilità. Rispetto a quest'ultima, ad esempio, sul concetto di modulo come misura – che in architettura è riferibile alla scala dell'individuo e del corpo in quanto mezzo attraverso il quale la persona si confronta con la realtà esterna definendo i concetti di grandezza e proporzione – occorre attivare una riflessione critica che superi il presupposto della standardizzazione dell'essere umano e tenga conto invece delle diversità; il termine 'persona' si fa oggi testimone di un'idea contemporanea di misura e di un nuovo approccio che trascende caratteristiche fisiche, età e genere riferendosi a tutti gli individui che vivono gli spazi della quotidianità con necessità diverse: il concetto di 'modularità assoluta', soprattutto nei processi di accessibilità ambientale e inclusione rispetto a questioni sensoriali e cognitive tipiche e atipiche, deve lasciare posto a quelli di 'modularità relativa', 'universalità', 'accessibilità', 'a misura di persona' con una 'flessibilità e adattabilità modulare' in relazione alla diverse tipologia di persone / utenti e alle differenti destinazioni d'uso (Milocco Borlini, Pecile and Conti, 2023).

Un tema attuale, quello del modulo nel Terzo Millennio, che si rapporta con l'omologa proposizione introdotta da Giulio Carlo Argan (1965) nella raccolta di saggi dal titolo Progetto e Destino, in cui lo storico indaga l'evoluzione del concetto di modulo e il suo modificarsi lungo la storia insieme ai modi del costruire: Argan introduce altresì una nuova e personale definizione, quella del 'modulo oggetto' come principio ideativo della costruzione, associandolo al 'modulo misura' come entità dimensionale astratta che stabilisce relazioni qualitative o metriche quantitative tra le parti. In quell'epoca l'applicazione del concetto di 'modulo oggetto', compendio dei concetti di 'modulo compositivo', 'modulo costruttivo' e 'modulo tipologico', si materializzava nelle strutture reticolari di Richard Buckminster Fuller e nella 'modularità addizionale' di Jorn Utzon, nel concetto di 'edificio aperto' di John N. Habraken (1972), nelle esperienze di produzione industrializzata di Konrad Wacsmann o di Kisho Kurokawa (la Nakagin Capsule Tower del 1971 è l'icona del Movimento metabolista) o negli arredi modulari di designers come Charles e Ray Eames e George Nelson, in Abitacolo (1971) di Bruno Munari, un 'hortus conclusus' infantile (come egli stesso lo definisce), oppure ancora nella sperimentazione del Sistema Abitativo di Pronto Impiego (SAPI, 1982) di Pierluigi Spadolini in risposta al tema dell'abitazione temporanea o d'emergenza. Le esperienze citate introducono oggi a nuove concettualizzazioni in progressiva evoluzione, di cui sono esempio le sperimentazioni WikiHouse (Open Systems Lab, 2011), Carmel Place (Narchitects Studio, 2016), The Peak Home (Grimshaw, 2020), TECLA (Mario Cucinella Architects, 2021), Mitosis (GG-loop with Arup, 2021), RED7 (MVRDV, 2022), i blocchi residenziali di Aarhus (BIG, 2022), il masterplan di Odesa Expo 2030 (Zaha Hadid Architects, 2022) o gli emblematici sistemi componibili add-On Radiator di Tube (Pakhalé, 2009) e Coordinates di Flos (Anastasiades, 2019), tutti progetti nei quali il concetto di modulo consente di interpretare e generare spazi, organismi e oggetti complessi e diversificati. Sulla base di queste premesse il volume 14 di AGATHÓN raccoglie saggi e ricerche che, seppur non esaustivi delle innumerevoli declinazioni assumibili dal modulo per affrontare, discretizzare e risolvere la complessità del costruito, ne evidenziano la natura multiscale e la flessibilità concettuale e d'uso.

Alla scala paesaggistica i concetti di modulo e modularità offrono spunti per ragionare su temi e questioni che possono orientare strategie e azioni per il progetto di adattamento nei paesaggi moderni, come avvenuto ad esempio per quelli del Metaponto (Basilicata, Italia) e delle Everglades (Florida, USA), sorti dalla bonifica di aree umide: la sfida che il cambiamento climatico pone a questi contesti è legata a un ripensamento delle loro logiche di funzionamento, delle dinamiche socio-ecologiche e dei modi di abitare poiché la modularità delle aree umide precedenti alla bonifica è stata sostituita da

una matrice modulare 'disegnata' alternativa e segregativa che li ha resi particolarmente fragili ai cambiamenti socio-ecologici e climatici (Brisotto et alii, 2023). Il modulo può essere un espediente comunicativo che consente di mettere a punto una narrazione modulare oppure un elemento fisico che, con carattere fortemente identitario e di riconoscibilità, assume la valenza di 'struttura di servizio' nel paesaggio lungo itinerari e punti notevoli che ne rappresentano le peculiarità; è esempio il progetto Pays Aimables che, individuando uno specifico ritmo nell'attraversamento di tre differenti paesaggi tra Liguria e Piemonte (Italia), tramite l'uso di strumenti digitali innovativi è in grado di attivare relazioni tra spazio, comunità e turismo a partire dalle unità di paesaggio concepite come moduli di una partitura fisico-estetica dello spazio e tessere di un articolato mosaico dal carattere fortemente identitario (Gherzi et alii, 2023); e ancora le architetture modulari di piccola scala presenti lungo il tracciato della ciclovia Ven-To che collega Venezia e Torino (Italia) o lungo il tracciato turistico-religioso della via Francigena che collega Roma (Italia) a Canterbury (Francia) che accolgono con flessibilità d'uso, secondo tecniche e principi di reversibilità, i servizi per la fruizione del territorio (Valdecabres and Besana, 2023). Nonostante il modulo sia intimamente connesso ai concetti di proporzione e geometria la modularità può costituire uno strumento a supporto di processi illuminanti nella produzione di paesaggi urbani di alta qualità a misura d'uomo: in tal senso le sperimentazioni di James C. Rose del 1946 sui giardini modulari, con i loro richiami alla cultura giapponese, organizzano armoniosamente lo spazio coniugando economia di mezzi, manifattura, facilità di realizzazione, flessibilità, estetica e personalizzazione in ragione delle specifiche esigenze del cliente, aprendo la strada a una cultura contemporanea e a una pratica in cui valorizzare i binomi manifattura e tecnologia, qualità di realizzazione e bellezza (Visilia, 2023).

Alla scala urbana per strutturare l'azione regolamentativa, prefigurativa e attuativa dello spazio, in un'ottica transdisciplinare, è possibile ipotizzare categorie di lettura, 'moduli', quali strumenti utili al superamento di una visione statica e lineare del costruito attraverso i tre concetti di Tipologia, Topografia e Tettonica, tutti intimamente legati alla condizione fisica delle città ed espressione di una molteplicità di pratiche e valori sociali e collettivi: la costruzione di abachi e cataloghi può così restituire modalità e soluzioni ricorrenti per guidare il progetto nella sua duplice componente materiale e immateriale, mettendo in luce le dinamiche dei processi urbani e recuperando la doppia valenza del concetto di modulo di Giulio Carlo Argan (1965) in quanto sintesi ed espressione culturale e contemporaneamente strumento di misurazione, di valutazione e monitoraggio quali-quantitativo (Gomes, 2023). Questa duplice chiave di lettura è applicabile all'involucro esterno degli edifici e consente di interpretare la relazione che esiste tra il modo in cui l'involucro è concepito e il paradigma spaziale a cui si fa riferimento: una differente interpretazione del rapporto tra spazio interno ed esterno si riflette nella dicotomia facciata / pelle di un edificio, nella quale la prima è il risultato di una composizione 'commodulata' ai caratteri del luogo nel quale si inserisce e con il quale struttura relazioni, la seconda è intesa come oggetto autonomo 'tecnologico' ed espressione di una dinamica interna a un processo progettuale fondato su parametri di ottimizzazione delle prestazioni ambientali ed energetiche (Scala, 2023).

Rispetto ai temi della rigenerazione urbana e del recupero e riuso del patrimonio edilizio esistente, il concetto di modulo può consentire di individuare, attraverso un'analisi tipologica e costruttiva degli edifici dei piccoli centri urbani, un elemento modulare diagrammatico, in risposta alla disomogeneità del tessuto edilizio, e privo di funzioni prestabilite tramite il quale operare sulle potenzialità dell'indeterminatezza, sui ritmi e sugli accostamenti: un elemento capace di adattarsi, in forma singola o aggregata, di scomporre e di ricomporre il tessuto urbano in forme nuove atte a mediare tra lo spazio pubblico e privato, divenendo l'immagine di un rinnovato archetipo compositivo (Velo and Cervesato, 2023). Nella condizione di circostanze estreme che richiedono interventi rapidi, come l'improvviso aumento della domanda di alloggi dopo un disastro, il modulo risulta funzionale per il suo potenziale di razionalizzazione, adattabilità, efficienza in termini di tempo ed economia e scalabilità; tuttavia, sebbene il suo impiego sia largamente diffuso in pratiche tanto nel Moderno quanto nel panorama contemporaneo internazionale, è necessario riflettere su come, in un'epoca di migrazioni di massa, si possano soddisfare entrambe le istanze della temporaneità e della permanenza rispetto alla scala urbana e chiedersi se il tempo, fattore determinante nella produzione del patrimonio edilizio, possa diventare atemporale attraverso l'applicazione di un innovativo approccio modulare a partire da interventi storicizzati e logiche 'informali' consolidate (Schreyer, 2023).

In quanto unità dimensionale di un sistema il modulo è uno strumento utile per interrogare e pianificare le città, costruendo metodologie di lettura e analisi dei sistemi urbani secondo principi ripetibili e univoci; ad esempio rispetto al fenomeno dell'isola di calore, mappando a scala urbana i dati ambientali di temperatura su una griglia con modulo quadrato, è possibile restituire il sistema infrastrutturale e morfologico in termini di grafo e tassellazione e fornire al pianificatore supporto alle proprie analisi individuando in modo puntuale dove è necessario intervenire per contrastare le vulnerabilità dovute all'aumento localizzato delle temperature (Magliocco and Oneto, 2023). Anche gli spazi intermedi urbani possono costituire un sistema modulare strutturante lo spazio, le relazioni e le dinamiche urbane in chiave climatica, con un apporto attivo rispetto alle prestazioni ecologiche dell'intero sistema urbano, in particolare in ottica di decarbonizzazione e mitigazione climatica; un'adeguata metodologia di classificazione e analisi degli spazi intermedi, attraverso i criteri di Naturalità, Prossimità e Circolarità e in rapporto ai sei assi strategici delle Green City, insieme a un metodo di valutazione della riduzione delle emissioni climalteranti, può fornire uno strumento strategico per modulare le dinamiche urbane e migliorare la qualità ambientale, rendendo i luoghi più sicuri, fruibili e qualificati (Tucci, Altamura and Pani, 2023). Ricondurre la complessità di un sistema a singoli moduli può costituire un approccio utile anche nella valutazione dell'insieme degli effetti, positivi e negativi, delle atti-

vità antropiche sulla biosfera, ad esempio superando le criticità e i limiti che alcuni strumenti come LCA, ERA ed ESA analizzati singolarmente presentano rispetto a scale spaziali e temporali, obiettivi, metodologie di indagine, metriche e percorsi causa-effetto; una loro integrazione, all'interno di una metodologia di indagine strutturata per moduli in chiave olistica e sistemica, può concorrere a superare l'attuale policrisi che amplifica lo stato di incertezza sul nostro futuro e la vulnerabilità dell'intero ecosistema, individuando soluzioni progettuali capaci di arrestare il cambiamento climatico, ridurre i rischi per la salute umana e contrastare la perdita di biodiversità (Sposito and De Giovanni, 2023).

Alla scala architettonica i sistemi abitativi modulari prefabbricati possono fornire risposte speditive all'attuale carenza di alloggi sfruttando una soluzione costruttiva efficiente e versatile, fondata sulle continue sperimentazioni tipologiche e tecnologiche che per la specifica categoria degli studenti universitari, a partire dagli anni Sessanta con Car Body / Pressed Metal Cabin e fino ai nostri giorni con la Fel-da Housing di Wembley a Londra, hanno caratterizzato il panorama architettonico internazionale con una inaspettata espressività creativa capace di governare, attraverso i principi dell'industrializzazione e della prefabbricazione, molteplici aspetti di processo e di prodotto come la semplicità e la velocità costruttiva, il controllo rigoroso dei costi di realizzazione, la riduzione degli scarti di lavorazione e la qualità dei livelli prestazionali (Bellini, Arcieri and Gullace, 2023). In particolare l'uso di elementi prefabbricati in legno ha favorito lo sviluppo di soluzioni abitative modulari facilmente assemblabili, come testimoniano le sperimentazioni degli anni '70 di Walter Segal e il suo sistema costruttivo in legno, basato sulla modularità e componibilità dei materiali nei formati disponibili in commercio (Di Virgilio, 2023). In generale è da rilevare che a partire dalla Copper House (1929) di W. Gropius e dalla Jacobs House (1929) di F. L. Wright fino alle case prefabbricate Minimal (2021) dello studio spagnolo Metro 7 e al prototipo di una tiny dwelling di Norman Foster la costante innovazione di prodotto e di processo ha permesso di accelerare i processi di prefabbricazione e assemblaggio e di dar vita a sperimentazioni ispirate dalle transizioni digitale ed ecologica in un'ottica di riduzione dell'impatto ambientale, di ottimizzazione delle risorse, di miglioramento delle prestazioni di isolamento termico e di personalizzazione di cui nZEM (nearly Zero Energy Module), con il suo involucro opaco realizzato in platform frame e integrato con elementi trasparenti ad alte prestazioni e tecnologie per la produzione di energia rinnovabile, è esempio degno di nota (Romano and Di Monte, 2023).

L'approccio modulare è ampiamente utilizzato in architettura anche attraverso schemi funzionali che da un lato garantiscono differenti aggregazioni delle unità spaziali elementari e dall'altro consentono di semplificare strutture architettoniche complesse e favorirne la flessibilità; queste specificità del modulo risultano utili nella progettazione dell'edilizia sanitaria, intrinsecamente legata a normative di carattere igienico, funzionale, tecnologico e ambientale, condizionata da un complesso sistema di relazioni tra funzioni (specializzazioni), 'percorsi' (di pazienti, operatori e farmaci) e logistica e fortemente connotata da sistemi tecnologici specialistici e da una rapida obsolescenza funzionale (Pollo, Biolchini and Scognamiglio, 2023).

Strumenti analitici e progettuali basati su 'moduli esperienziali' sono quelli proposti da Experiential Design Schemas (Dekay and Tornieri, 2023), una ricerca sul tema del modulo che ha l'obiettivo di contribuire a una maggiore qualità dell'esperienza spaziale nel rapporto tra architettura e natura; l'architettura è intesa come un dispositivo sensoriale che ha una condizione privilegiata nella relazione uomo / natura, un'opera aperta consapevole delle infinite variabilità dell'esperienza umana e della capacità della scienza di misurarne gli effetti sul benessere dell'individuo. Il benessere all'interno degli spazi di lavoro è un altro tema rispetto al quale il modulo può costituire uno strumento di analisi; così come il concetto di ufficio può essere analizzato attraverso le sue dimensioni modulari spaziali, tecnologiche, semantiche, sociali e temporali, ciascuna delle quali è suddivisibile in categorie di concetti, teorie e modelli, anche il dato, nella sua forma essenziale, è un modulo che correlato con altri dati può mettere in evidenza insiemi di relazioni utili a svelare nuovi significati progettuali, restituire schemi comportamentali e integrare strumenti per gestire le attività lavorative, il tutto per elaborare soluzioni sostenibili, flessibili, produttive e collaborative volte a migliorare le condizioni di benessere nei luoghi di lavoro (Tamborini and Cretaio, 2023).

La modularità e la possibilità di personalizzare soluzioni di arredo e componenti all'interno delle abitazioni sono aspetti fondamentali per rispondere alle specifiche e mutevoli esigenze degli utenti anziani, poiché i moduli, combinati o assemblati per creare configurazioni diverse, consentono una certa flessibilità nell'adattare lo spazio alle esigenze specifiche, anche in situazioni caratterizzate da vincoli, e risultano particolarmente efficaci rispetto a un'assistenza orientata all'utente; in quest'ottica una ricerca finanziata dall'Ateneo 'Sapienza' ha strutturato un sistema di valutazione multicriteri basato sull'Analytic Hierarchy Process utile a selezionare e verificare, su base prestazionale, la rispondenza di arredi age-friendly e care-friendly disponibili sul mercato anche in relazione alla modularità e alla predisposizione alla personalizzazione, considerando l'intero corso della vita delle persone e la mutevolezza delle loro esigenze (Villani and Romagnoli, 2023).

Alla scala del dettaglio e della materia preme ribadire la centralità della modularità quale strategia per affrontare, in modo efficiente ed efficace, la suddivisione in unità funzionali e tecnologiche disgiunte, ma coerenti e interdipendenti, di una struttura complessa come l'involucro edilizio responsivo, un'interfaccia ispirata al pensiero sistemico e alla biomimetica e caratterizzata da un considerevole grado di complessità per la regolazione degli scambi di energia e di materia tra ambiente interno ed esterno; a supporto della tesi diversi sono i progetti, le ricerche e le sperimentazioni che, avvalendosi delle possibilità offerte dalla progettazione parametrica e dalla scienza dei materiali, propongono inedite applicazioni basate su tassellazioni, origami, kirigami, metamateriali e nuove soluzioni tecnologico-formali che prefigurano sviluppi futuri in chiave multidisciplinare e multiscale (Manni and Valzano,

2023). L'approccio modulare in architettura e nell'industrial design interessa anche la fabbricazione digitale 3D / 4D e la progettazione della materia, con applicazioni funzionali alla valorizzazione degli scarti di produzione e alla realizzazione di edifici adattivi e responsivi. Nel binomio progettazione parametrica / stampa 3D di componenti il concetto di modulo può intervenire da un lato come componente riproducibile, dall'altro in quanto codice di comunicazione uomo-macchina in algoritmi ripetuti che consentono la realizzazione per strati di oggetti con forme e tessiture variegata: è il caso del progetto Arcadia, una seduta realizzata con manifattura additiva che impiega impasti e miscele che consentono di utilizzare sfridi, polveri e fanghi provenienti da settori produttivi diversi, con il riciclo di circa l'80% di materiale di scarto in un'ottica di innovazione e circolarità (Gasparini, 2023). Nella stampa 4D i cinematismi dei materiali e le configurazioni geometriche che gli oggetti stampati possono acquisire dipendono non solo dai materiali, ma anche dalla loro combinazione, dal tempo e dagli stimoli ambientali; diversi sono le sperimentazioni in atto e tra queste la DFAB House, sviluppata e realizzata dall'ETH di Zurigo, il TOVA, il primo edificio spagnolo stampato interamente in 3D tramite l'impiego di una miscela a base di terra, aloe, albume d'uovo ed enzimi e le strutture a torre, denominate Aguahoja, del Mediated Matter Lab del MIT che impiegano elementi modulari dinamici mediante tecniche di bio-stampaggio (Morbiducci, Polverino and Battaglia, 2023). Sfruttando i progressi della scienza dei materiali, della fabbricazione digitale e della progettazione computazionale è possibile definire le relazioni tra le caratteristiche dei materiali dei diversi strati e tramite il processo di stampa additiva 'programmare' direttamente la meso-architettura del materiale, prevedendo degli attuatori di derivazione biologica e igro-responsivi, ad esempio i Compositi Polimerici di Legno, reiterati in moduli che funzionano come blocchi a diverse scale gerarchiche lungo linee di stampa secondo le proprietà meccaniche e la reazione passiva alle variazioni di umidità desiderate (Correa et alii, 2023).

Alla luce del cogente dibattito sulla transizione verso l'economia circolare l'approccio modulare può assumere un ruolo determinante nel processo di trasformazione dell'attuale modello economico da lineare a circolare, valorizzando ad esempio il tema dell'assemblaggio e del dis-assemblaggio di componenti modulari a partire dal principio che l'edificio è una struttura in costante evoluzione, caratterizzata da flessibilità e reversibilità in termini di spazio, funzioni, struttura e materiali. Un tale approccio progettuale acquisisce particolare interesse se applicato a edifici preesistenti grazie alla possibilità di garantirne la preservazione attraverso interventi di trasformazione, rifunzionalizzazione, sovrapposizione, giustapposizione e/o integrazione anche attraverso azioni parziali o selettive, creando quei presupposti presenti in alcuni progetti spagnoli a firma dei Maestri del '900 e contemporanei a firma di Miguel Fisac, Ensamble Studio e Arturo Franco Díaz (Pirina, Comi and Frangipane, 2023). Nell'industrial design, attraverso un cambio di paradigma dalla logica industriale del 'fare per disfare' – che concepisce prodotti modulari e disassemblabili soprattutto per riciclarne a fine vita – alla logica del 'fare per rifare' è possibile dar corpo a nuove caratteristiche di riutilizzabilità, riparabilità e rifabbricabilità: alcuni casi studio, tra cui la bicicletta Roetz Life, la poltrona Costume e il notebook Concept Luna, ben esemplificano la transizione della cultura del design dal 'disassembling' al 're-making', declinabile in modi diversi per tipologie merceologiche differenti (Pietroni, Di Stefano and Galloppo, 2023). Un approccio modulare al progetto può riuscire a soddisfare alcune delle molteplici istanze dello spazio pubblico contemporaneo e in particolare quella della mobilità sostenibile attraverso strutture multifunzionali e integrate di servizi-prodotti-comunicazione; è il caso degli Smart Hubs di Ferrara, i cui elementi modulari consentono a più livelli di implementare, con un elevato grado di personalizzazione, la funzione base di stazione per la ricarica di veicoli elettrici con ulteriori servizi, ma soprattutto, grazie a un'infrastruttura tecnologica IoT e a una serie di sensori, favoriscono il monitoraggio partecipativo della qualità dell'aria promuovendo la costruzione di comunità più consapevoli e attive rispetto al tema della sostenibilità ambientale e del benessere umano (Fabbri, 2023).

Anche in ambito biomedicale la modularità e la possibilità di personalizzare i kit per la medicina riabilitativa neuro-psicologica, ortopedica e logopedica costituiscono una potenziale soluzione per sviluppare strumenti più flessibili, ergonomici, confortevoli, sostenibili e adattabili ai diversi trattamenti ed esercizi terapeutici e alle complesse esigenze di pazienti e terapisti: esempi sono il deambulatore a tre ruote Rollz Flex, utilizzabile in diverse fasi del processo di riabilitazione di pazienti che devono recuperare le capacità motorie degli arti inferiori, il dispositivo massaggiatore Novafon, attrezzato con teste di vibrazione di dimensioni e forme differenti per agire a diverse profondità e con diversi tipi di stimolazioni, il kit G-stories, uno strumento multifunzionale e modulare sviluppato per facilitare la logopedia nel trattamento di disprassie oro-bocca-facciali nei bambini, e infine il kit sperimentale e modulare Sensitize / Reactivate per la riabilitazione neurocognitiva, per riconoscere e definire specifiche stimolazioni tattili al fine di recuperare percezione, per stimolare muscoli e articolazioni del volto allo scopo di riattivare le connessioni e le capacità motorie (Langella, Carleo and De Luca, 2023). Il disassemblaggio di elementi modulari può assumere una valenza ambientale strategica anche nell'industria della moda non solo per la produzione di indumenti, ma anche per le dinamiche ambientali economiche, culturali e sociali che determina: il 'design trasformabile e modulare' risponde a svariate esigenze funzionali-performative e/o estetiche capaci di rispondere ad altrettanti gusti soggettivi oppure a specifiche tendenze del momento, ma al contempo si pone come strategia utile a sfruttare meglio le risorse tessili e a prolungare la durata di vita di tessuti e capi d'abbigliamento (Casciani, 2023).

Con le loro infinite scale applicative, 'dal cucchiaino alla città' (Rogers, 1952), il 'modulo' e la 'modularità' riemergono con forza nel nuovo Millennio e possono divenire paradigma a supporto degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (UN, 2015) se associati ai temi della reversibilità e dell'accessibilità; in aggiunta le variegata declinazioni concettuali e strumentali del 'modulo' e della 'modularità' possono fornire supporto lungo l'intero ciclo di vita di un sistema, ottimizzandone le fasi ideative, pro-

duttive / realizzative e quelle di gestione del Paesaggio, della Città, dell'Architettura e dell'Industrial Design, consentendo il superamento di una visione statica e lineare del costruito attraverso 'sistemi aperti', 'flessibili', 'adattivi', 'multiscalarari' e 'sostenibili' soprattutto quando gestiti mediante strumenti digitali intelligenti.

The Module is a sign, a linear trend, a geometric or free form repeated within a given space while maintaining its proportions. It is exemplary form, norm and rule, number, elementary unit and measure. It is a concept that expresses harmony, proportion, and quality. It is a catalytic element of history, culture and memory that refers, within the different disciplines of urban planning and landscape, architecture and engineering, representation, design and art, as much to man (the Kanon of Polykletos, the Vitruvian homo, Le Corbusier's Modulor) as to its artifacts and conceptualisations (the Greek embater or the still Vitruvian imoscape, the 'vesica piscis' or the medieval 'modus ad triangulum' and 'ad quadratum' and all its further and subsequent variations). The Module is both a measure of things and, simultaneously, a synthesis of the relationships that these measures activate (connections) or deactivate (separations). The Module is rhythm, interference, structure, relationship, mutation, and standardisation, but it is also a synthesis of the specific human ability to perceive, simplify and represent the environment. To design is both to measure and to relate. 'Contare e raccontare' (lit. counting and telling), as titled by Carlo Bernardini e Tullio De Mauro (2003), through the concept of the module that lends itself to being an expression of an act (counting or measuring) and at the same time of a narrative (telling), both actions enriched and nourished, in contemporaneity, by new semantic capital that, in its being material and immaterial, real and digital together, activates new transdisciplinary and interdisciplinary relations involving and contaminating the different scale of the project.

The Module, in its capacity as a holistic measure of things, measure and measurability, seems to share, with the new contemporaneity, the idea of a 'different' space – at any scale – to be re-measured and re-counted both in the current configuration (the existing one) and with respect to that which it could and/or should be (the new). In this perspective, within the environmental design and transformative approaches, a renewed and contemporary expression of the Module seems to be emerging, dynamically confronting the inescapable demands of interoperability, virtualisation, decentralisation and sustainability. With respect to the latter, for example, on the concept of module as measure – which in architecture refers to the scale of the individual and the body as a means by which the person confronts external reality by defining the concepts of magnitude and proportion – it is necessary to activate a critical reflection that goes beyond the assumption of the standardization of the human being and instead takes into account diversity; the term 'person' now witnesses a contemporary idea of measure and a new approach that transcends physical characteristics, age and gender by referring to all individuals who experience the spaces of everyday life with different needs: the concept of 'absolute modularity', especially in processes of environmental accessibility and inclusion with respect to typical and atypical sensory and cognitive issues, must give way to those of 'relative modularity', 'universality', 'accessibility', 'person-friendly' with a 'modular flexibility and adaptability' in relation to different types of people / users and different use destinations (Milocco Borlini, Pecile and Conti, 2023).

A currently relevant theme, that of the Module in the Third Millennium, which relates to the counterpart proposition introduced by Giulio Carlo Argan (1965) in the collection of essays entitled *Progetto e Destino* (lit. project and destiny), in which the historian investigates the evolution of the concept of the Module and its modification throughout history along with the modes of building, synthesis and cultural expression, while also introducing a new and personal definition, that of the 'object module' as the creative principle of construction, associating it with the 'module-measure' as an abstract dimensional entity that establishes qualitative or metric quantitative relationships between parts. At that time, the application of the concept of 'object module', a compendium of the concepts of 'compositional module', 'constructive module' and 'typological module', materialised in Richard Buckminster Fuller's lattice shell structures and Jorn Utzon's 'additive modularity', in the concept of 'open building' by John N. Habraken (1972), in the industrialised production experiences of Konrad Wacsmann or Kisho Kurokawa (the 1971 Nakagin Capsule Tower is the icon of the Metabolist Movement) or in the modular furniture of designers such as Charles and Ray Eames and George Nelson, in Bruno Munari's *Abitacolo* (1971), a childlike 'hortus conclusus' (as he calls it), or again in Pierluigi Spadolini's experimentation with SAPI (*Sistema Abitativo di Pronto Impiego*, 1982) in response to the theme of temporary or emergency housing. The aforementioned experiences now introduce progressively evolving new conceptualisations, examples of which can be seen in a number of experimentations, such as the WikiHouse (Open Systems Lab, 2011), Carmel Place (Narchitects Studio, 2016), The Peak Home (Grimshaw, 2020), TECLA (Cucinella, 2021), Mitosis (GG-loop with Arup, 2021), RED7 (MVRDV, 2022), the residential blocks in Aarhus (BIG, 2022), the Odesa Expo 2030 master plan (Zaha Hadid Architects, 2022), or the emblematic add-on Radiator modular systems by Tube (Pakhalé, 2009) and Coordinates by Flos (Anastassiades, 2019), all projects in which the module concept allows for the interpretation and generation of complex and diverse spaces, organisms, and objects. Based on these premises, volume 14 of AGATHÓN collects essays and research that, while not exhaustive of the innumerable declinations that can be taken on by the module to address, discretise and solve the complexity of the built environment, highlight its multi-scalar nature and its conceptual and usage flexibility.

At the landscape scale, the concepts of module and modularity offer insights for the discussion of themes and issues that can guide strategies and actions for the adaptation project in modern land-

scapes, as was the case, for example, with the landscapes of Metaponto (Basilicata, Italy) and the Everglades (Florida, USA), arising from wetland reclamation: the challenge that climate change poses to these contexts is linked to rethinking their operating logics, socio-ecological dynamics and ways of inhabiting, since the modularity of wetlands before reclamation has been replaced by a modular matrix 'designed' to be alternative and segregative, which has rendered them particularly fragile to both socio-ecological and climatic changes (Brisotto et alii, 2023). The module can act as a communicative expedient that enables the development of a modular narrative or as a physical element that, with a strongly identifying and recognizable character, takes on the value of a 'service structure' in the landscape along itineraries and notable points that represent its unique features; an example is the Pays Aimables project which, by identifying a specific rhythm in the crossing of three different landscapes between Liguria and Piedmont (Italy), through the use of innovative digital tools is able to activate relationships between space, community and tourism starting from landscape units conceived as modules of a physical-aesthetic score of space and tesserae of an articulated mosaic with a strongly identity character (Gherzi et alii, 2023); and also the small-scale modular architectures present along the Ven-To cycle route connecting Venice and Turin (Italy) or along the tourist-religious route of the Via Francigena connecting Rome (Italy) to Canterbury (France) that welcome services for the fruition of the territory with flexibility of use, according to techniques and principles of reversibility (Valldecabres and Besana, 2023). Although the module is intimately connected to the concepts of proportion and geometry, modularity can be a tool to support enlightening processes in the production of high-quality urban landscapes on a human scale: in this sense, the experiments conducted by James C. Rose in 1946 on modular gardens, with their references to Japanese culture, harmoniously organise space by combining economy of means, workmanship, ease of fabrication, flexibility, aesthetics, and customisation according to the specific needs of the client, paving the way for a contemporary culture and practice in which to value the binomials of workmanship and technology, quality of fabrication and beauty (Visilia, 2023).

To structure the regulatory, prefigurative and actuative action of space at the urban scale, in a transdisciplinary perspective, it is possible to hypothesise reading categories, 'modules', as useful tools for overcoming a static and linear vision of the built environment through the three concepts of Typology, Topography and Tectonics, all intimately linked to the physical condition of cities and the expression of a multiplicity of social and collective practices and values: the construction of abacuses and catalogues can thus return recurring ways and solutions to guide the project in its twofold tangible and intangible components, shedding light on the dynamics of urban processes and reclaiming the double meaning of module by Giulio Carlo Argan (1965), as a synthesis and cultural expression and at the same time a tool for measurement, evaluation and qualitative-quantitative monitoring (Gomes, 2023). This dual key is applicable to the external envelope of buildings and allows for an interpretation of the relationship that exists between the way the envelope is conceived and the spatial paradigm referred to: a different interpretation of the relationship between interior and exterior space is reflected in the facade / skin dichotomy of a building, in which the former is the result of a composition that is 'commodified' to the characteristics of the place in which it is inserted and with which it structures relationships, while the latter is understood as an autonomous 'technological' object and the expression of an internal dynamic of a design process based on parameters of optimisation of environmental and energy performance (Scala, 2023).

Concerning the themes of urban regeneration and the rehabilitation and reuse of the existing building stock, the concept of the module can make it possible to identify, through a typological and constructive analysis of the buildings of small towns, a diagrammatic modular element, in response to the heterogeneity of the building fabric, and devoid of predetermined functions through which to operate on the potential of indeterminacy, rhythms and juxtapositions: an element capable of adapting, in single or aggregate form, of breaking down and recomposing the urban fabric into new forms designed to mediate between public and private space, thus becoming the image of a renewed compositional archetype (Velo and Cervesato, 2023). Given the condition of extreme circumstances requiring rapid action, such as the sudden increase in demand for housing after a disaster, the module is functional due to its potential for rationalisation, adaptability, time and economy efficiency, and scalability; however, although its use is widespread in practices across both the Modern and international contemporary landscape, it is necessary to reflect on how, in an age of mass migration, both instances of temporariness and permanence can be met for the urban scale, and ask whether time, a determining factor in the production of the built heritage, can become timeless through the application of an innovative modular approach from historicised interventions and established 'informal' logics (Schreyer, 2023).

As a dimensional unit of a system, the module is a useful tool for interrogating and planning cities, building methodologies for reading and analysing urban systems according to repeatable and unambiguous principles; for example, concerning the heat island phenomenon, by mapping environmental temperature data at the urban scale on a grid with a square module, it is possible to render the infrastructural and morphological system in terms of a graph and tessellation, and provide the planner with support for his or her analysis by promptly identifying where actions are required to counter vulnerabilities caused by localised temperature increases (Magliocco and Oneto, 2023). Urban intermediate spaces can also constitute a modular system that structures space, relationships, and urban dynamics from a climate perspective, with an active contribution toward the ecological performance of the entire urban system, particularly from a climate mitigation and decarbonisation perspective; an appropriate methodology for classifying and analysing intermediate spaces, through the criteria of Naturalness, Proximity and Circularity and relating to the six strategic axes of Green Cities, coupled with a method for evaluating the reduction of climate-changing emissions, can provide a strategic tool for modulating urban dynamics and improving environmental quality, making places safer,

more usable and qualified (Tucci, Altamura and Pani, 2023). Tracing the complexity of a system back to individual modules can also be a useful approach in assessing the overall positive and negative effects of anthropogenic activities on the biosphere, for example, overcoming the criticalities and limitations that some tools such as LCA, ERA and ESA, analysed individually, present regarding spatial and temporal scales, objectives, survey methodologies, metrics and cause-effect pathways; their potential integration, within an investigation methodology structured through modules in a holistic and systemic key, can help overcome the current polycrisis that amplifies the state of uncertainty about our future and the vulnerability of the entire ecosystem, identifying design solutions capable of halting climate change, reducing risks to human health and countering biodiversity loss (Sposito and De Giovanni, 2023).

At the architectural scale, prefabricated modular housing systems can provide timely responses to the current housing shortage by taking advantage of an efficient and versatile construction solution, based on the continuous typological and technological experiments which, for the specific category of university students, starting in the 1960s with Car Body / Pressed Metal Cabin and up to the present day with Felda Housing in Wembley, London, have characterised the international architectural scene with an unexpected creative expressiveness capable of governing, through the principles of industrialisation and prefabrication, multiple aspects of process and product such as simplicity and speed of construction, rigorous control of construction costs, reduction of manufacturing waste and quality of performance levels (Bellini, Arcieri and Gullace, 2023). In particular, the use of prefabricated wooden elements has encouraged the development of modular housing solutions that can be easily assembled, as evidenced by the experiments conducted in the 1970s by Walter Segal and his wooden building system, based on the modularity and composability of materials in commercially available formats (Di Virgilio, 2023). In general, it should be noted that starting from the Copper House (1929) by W. Gropius, and the Jacobs House (1929) by F. L. Wright, through to the Minimal prefabricated houses (2021) by the Spanish firm Metro 7 and Norman Foster's tiny dwelling prototype, constant product and process innovation has made it possible to accelerate prefabrication and assembly processes and to generate experimentations inspired by digital and ecological transitions to reduce environmental impact, optimise resources, improve thermal insulation performance, and customisation; nZEM (nearly Zero Energy Module), with its opaque envelope made of platform frame and integrated with high-performance transparent elements and renewable energy technologies, is a noteworthy example of this (Romano and Di Monte, 2023).

The modular approach is also widely used in architecture through functional schemes that, on the one hand, guarantee different aggregations of elementary spatial units and, on the other hand, make it possible to simplify complex architectural structures and promote their flexibility; these specific characteristics of the module are useful in the design of health care construction, which is intrinsically linked to regulations of hygienic, functional, technological and environmental nature, conditioned by a complex system of relationships between functions (specialisations), 'pathways' (of patients, operators and medication) and logistics, in addition to being strongly marked by specialised technological systems and rapid functional obsolescence (Pollo, Biolchini and Scognamiglio, 2023).

Experiential Design Schemas (Dekay and Tornieri, 2023), a research on the theme of the module that aims to contribute to a higher quality of spatial experience in the relationship between architecture and nature, proposes analytical and design tools based on 'experiential modules'; architecture is understood as a sensory device that has a privileged condition in the human / nature relationship, an open work that is conscious of the infinite variability of human experience and the ability of science to measure its effects on the individual's well-being. Well-being within workspaces is another issue regarding which the module can be a tool for analysis; just as the concept of an office can be analysed through its modular spatial, technological, semantic, social and temporal dimensions, each of which can be subdivided into categories of concepts, theories and models, data, in its essential form, is also a module that correlated with other data can highlight sets of relationships useful in revealing new design meanings, returning behavioural patterns and integrating tools to manage work activities, all of which can be used to develop sustainable, flexible, productive and collaborative solutions aimed at improving well-being conditions in the workplace (Tamborrini and Cretaio, 2023).

Modularity and the possibility of customising furniture solutions and components within homes are key aspects in responding to the specific and changing needs of elderly users, since modules, combined or assembled to create different configurations, afford flexibility in adapting space to specific needs, even in situations characterised by constraints, and are particularly effective for user-oriented care; with this in mind, a study funded by the University 'Sapienza' structured a multi-criteria evaluation system based on the Analytic Hierarchy Process, useful to select and verify, on a performance basis, the compliance of age-friendly and care-friendly furniture available on the market, also concerning modularity and predisposition to customisation, considering people's entire lifespan and the variability of their needs (Villani and Romagnoli, 2023).

At the scale of detail and material, it is important to reiterate the centrality of modularity as a strategy for efficiently and effectively dealing with the subdivision into disjointed but coherent and interdependent functional and technological units of a complex structure, such as the responsive building envelope, an interface inspired by systems thinking and biomimicry and characterised by a considerable degree of complexity for the regulation of energy and matter exchanges between the internal and external environment; several projects, research and experiments support this thesis, proposing unprecedented applications based on tessellations, origami, kirigami, metamaterials and new technological-formal solutions that foreshadow future developments in a multidisciplinary and multiscale key

(Manni and Valzano, 2023), making use of the possibilities offered by parametric design and materials science. The modular approach in architecture and industrial design also affects 3D / 4D digital fabrication and material design, with functional application in the valorisation of production waste and the creation of adaptive and responsive buildings. In the pairing of parametric design / 3D printing of components, the concept of the module can intervene on the one hand as a replicable component, and on the other hand as a code for human-machine communication in repeated algorithms that enable the layered fabrication of objects with varied shapes and textures: this is the case of the Arcadia project, a seat made with additive manufacturing that employs mixtures and blends that make it possible to use scraps, powders and sludge from different production sectors, with the recycling of about 80% of waste material in a perspective of innovation and circularity (Gasparini, 2023). In 4D printing, material kinematics and the geometric configurations that printed objects can acquire depend not only on the materials but also on their combination, time and environmental stimuli; among the several ongoing experiments are: the DFAB House, developed and built by ETH Zurich; TOVA, Spain's first building printed entirely in 3D through the use of a mixture of soil, aloe, egg white and enzymes; and MIT's Mediated Matter Lab's Aguahojá tower structures, which employ dynamic modular elements through bio-molding techniques (Morbiducci, Polverino and Battaglia, 2023). By leveraging advances in materials science, digital fabrication, and computational design, it is possible to define the relationships between the material properties of different layers, and directly 'program' the meso-architecture of the material through the additive printing process by envisioning biologically derived and hygro-responsive actuators, e.g., Wood Polymer Composites (WPCs), reiterated in modules that function as building blocks at different hierarchical scales along printing lines in accordance with mechanical properties and passive reaction to desired moisture changes (Correa et alii, 2023).

In light of the pressing debate on the transition to a circular economy, the modular approach can take on a decisive role in the process of transforming the current economic model from linear to circular, enhancing, for example, the theme of assembly and disassembly of modular components, based on the principle that the building is a constantly evolving structure, characterised by flexibility and reversibility in terms of space, function, structure and materials. Such a design approach is of particular interest when applied to pre-existing buildings, due to the possibility of guaranteeing their preservation through interventions of transformation, re-functionalization, superimposition, juxtaposition and/or integration, even through partial or selective actions, thereby creating those prerequisites present in certain Spanish projects signed by 20th-century and contemporary masters such as Miguel Fisac, Ensemble Studio and Arturo Franco Díaz (Pirina, Comi and Frangipane, 2023). In industrial design, through a paradigm shift from the industrial logic of 'making to unmake' – which conceives modular and disassemblable products mostly with the aim of recycling materials at end-of-life – to the logic of 'making to remake', it is possible to substantiate new characteristics of reusability, reparability, and re-manufacturability: several case studies, including the Roetz Life bicycle, the Costume armchair and the Concept Luna notebook, clearly exemplify the transition of design culture from 'disassembling' to 'remaking', which can be declined in different ways for different product types (Pietroni, Di Stefano and Galoppo, 2023). A modular approach to design can succeed in satisfying some of the multiple demands of contemporary public space and in particular that of sustainable mobility through multifunctional and integrated service-product-communication structures; this is the case of the Smart Hubs in Ferrara, whose modular elements make it possible to implement the basic function of an electric vehicle charging station with additional services at multiple levels, with a high degree of customisation, but above all, thanks to an IoT technology infrastructure and a series of sensors, they encourage participatory monitoring of air quality by promoting the construction of communities that are more aware and active on the issue of environmental sustainability and human well-being (Fabri, 2023).

In the biomedical field, modularity and the possibility of customizing kits for neuro-psychological, orthopedic and speech-language therapy rehabilitation medicine are a potential solution for developing more flexible, ergonomic, and comfortable tools, sustainable and adaptable to different therapeutic treatments and exercises and to the complex needs of patients and therapists: examples include the Rollz Flex three-wheeled walker, which can be used at different stages of the rehabilitation process of patients who need to regain lower limb motor skills; the Novafon massage device, equipped with vibration heads of different sizes and shapes to act at different depths and with different types of stimulation; the G-stories kit, a multifunctional and modular tool developed to facilitate speech therapy in the treatment of oral-mouth-facial dyspraxias in children, and finally the experimental and modular Sensitize / Reactivate kit for neurocognitive rehabilitation, to recognize and define specific tactile stimulations for the purpose of recovering perception, stimulating muscles and facial joints in order to reactivate connections and motor skills (Langella, Carleo and De Luca, 2023). The disassembly of modular elements can also take on a strategic environmental value in the fashion industry, not only for the production of garments, but also for the economic, cultural and social environmental dynamics it generates: 'transformable and modular design' responds to a variety of functional-performative and/or aesthetic needs capable of responding to as many subjective tastes or specific trends of the moment, but at the same time it stands as a useful strategy to make better use of textile resources and extend the life span of fabrics and garments (Casciani, 2023).

With their infinite application scales, 'from the spoon to the city' (Rogers, 1952), the 'module' and 'modularity' resurface strongly in the new Millennium and can become a paradigm in support of the Sustainable Development Goals (UN, 2015) if associated with the themes of reversibility and accessibility, in addition, the varied conceptual and instrumental declinations of 'module' and 'modularity' can

provide support throughout the entire life cycle of a system, optimising its ideational, production / implementation and management phases in Landscape, City, Architecture and Industrial Design, enabling the overcoming of a static and linear view of the built environment through ‘open’, ‘flexible’, ‘adaptive’, ‘multi-scalar’ and ‘sustainable’ systems especially when managed through intelligent digital tools.

References

- Argan, C. G. (1965), *Progetto e Destino*, Il Saggiatore, Milano.
- Bellini, O. E., Arcieri, M. and Gullace, M. T. (2023), “Sistemi abitativi off-site – Soluzioni speditive per l’abitare da studenti | Off-site modular housing systems – Expeditious solutions for student residence”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 152-163. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14122023 [Accessed 31 December 2023].
- Bernardini, B and De Mauro, T. (2003), *Contare e raccontare – Dialogo sulle due culture*, Laterza, Roma.
- Brisotto, C., Carney, J., Macaione, I. and Raffa, A. (2023), “Cambiamenti climatici nei paesaggi di bonifica – Adattamento tra modulo e modularità | Climate change in reclamation landscapes – Adaptation between module and modularity”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 62-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14422023 [Accessed 31 December 2023].
- Casciani, D. (2023), “Moda e design modulare – Modularità come strategia di design per la sostenibilità | Fashion and modular design – Modularity as a design strategy for sustainability”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 326-337. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14282023 [Accessed 31 December 2023].
- Correa, D., Bianconi, F., Filippucci, M. and Pelliccia, G. (2023), “Pattern modulari nel design igroscopico con stampa 4D – Forma e programmazione del materiale | Modular patterns in hygroscopic 4D printing design – Form and programming of the material”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 264-273. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14222023 [Accessed 31 December 2023].
- DeKay, M. and Tornieri, S. (2023), “Schemi per la progettazione esperenziale – Combinare pensiero modulare e teoria integrale | Experiential design schemas – Combining modular thinking with integral theory”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 40-49. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1422023 [Accessed 31 December 2023].
- Di Virgilio, N. (2023), “Fare molto con poco – Un’architettura modulare, a partire da Walter Segal | Making a lot with little – Modular architecture, starting with Walter Segal”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 164-173. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14132023 [Accessed 31 December 2023].
- Fabbri, I. (2023), “Smart Hubs – Una rete di oggetti urbani multifunzionali a supporto della micromobilità a Ferrara | Smart Hubs – A network of multifunctional urban objects to support micromobility in Ferrara”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 304-315. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14262023 [Accessed 31 December 2023].
- Gasparini, K. (2023), “Design litico e manifattura additiva – Un connubio possibile per l’economia circolare | Lithic design and additive manufacturing – A feasible partnership for the circular economy”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 316-325. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14272023 [Accessed 31 December 2023].
- Gherzi, A., Pericu, S., Delprino, F. and Melli, S. (2023), “Misurare i paesaggi – Un ritmo per la narrazione attraverso luoghi e itinerari condivisi | Measuring landscapes – A storytelling rhythm through shared places and itineraries”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 194-203. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14162023 [Accessed 31 December 2023].
- Gomes, S. (2023), “Tipologia, topografia e tettonica – Categorie e modelli per il progetto urbano | Typology, topography and tectonics – Categories and models for the urban project”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 84-95. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1462023 [Accessed 31 December 2023].
- Habraken, N. J. (1972), *Supports – An alternative to mass housing*, Architectural Press, London.
- Langella, C., Carleo, S. and De Luca, M. (2023), “Modularità come strategia per il design medicale | Modularity as a strategy for medical design”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 294-303. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14252023 [Accessed 31 December 2023].
- Magliocco, A. and Oneto, G. (2023), “Configurazioni spaziali nell’analisi ambientale urbana – Il contributo dell’isola di calore | Spatial configurations in urban environmental analysis – The role of the heat island effect”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 216-223. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14182023 [Accessed 31 December 2023].
- Manni, V. and Valzano, L. S. (2023), “Modularità e architettura adattiva – Una strategia per la gestione di sistemi d’involucro complessi | Modularity and adaptive architecture – A strategy for managing complex envelope systems”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 134-151. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1411023 [Accessed 31 December 2023].
- Milocco Borlini, M., Pecile, A. and Conti, C. (2023), “Oltre il corpo – Ripensare il modulo per favorire l’inclusione sociale | Beyond the body – Rethinking the architectural module to promote social inclusion”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 174-181. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14142023 [Accessed 31 December 2023].
- Morbiducci, R., Polverino, S. and Battaglia, C. (2023), “Stampa 4D per componenti costruttivi modulari – Applicazioni e principali sviluppi | 4D printing for modular construction components – Applications and main developments”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 182-193. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14152023 [Accessed 31 December 2023].
- Pietroni, L., Di Stefano, A. and Galloppo, D. (2023), “Il design modulare verso l’economia circolare – Dal ‘fare per disfare’ al ‘fare per rifare’ | Modular design towards the circular economy – From ‘making to unmake’ to ‘making to remake’”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 274-283. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14232023 [Accessed 31 December 2023].
- Pirina, C., Comi, G. and Frangipane, A. (2023), “Assemblaggio e dis-assemblaggio – Il modulo come elemento compositivo per una ‘nuova’ sostenibilità – Il caso spagnolo | Assembly and disassembly – The module as a compositional

element for a ‘new’ sustainability – The Spanish case”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 106-115. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1482023 [Accessed 31 December 2023].

Pollo, R., Biolchini, E. and Scognamiglio, V. (2023), “Progettare le Case della Comunità – Applicazione dell’approccio modulare a un modello innovativo di presidio | Designing Community Houses – Application of the modular approach to an innovative model of facility”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 224-235. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14192023 [Accessed 31 December 2023].

Romano, R. and Di Monte, E. (2023), “Moduli nearly Zero Energy – Modelli abitativi a basso impatto ambientale per la città del futuro | nearly Zero Energy Modules – Low-impact modular housing models for the city of the future”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 250-263. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14212023 [Accessed 31 December 2023].

Scala, P. (2023), “Non solo pelle – Modulo oggetto e modulo misura nella composizione dell’involucro architettonico | Not just skin – Object module and measure module in the composition of the architectural envelope”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 96-105. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1472023 [Accessed 31 December 2023].

Schreyer, Y. C. (2023), “Oltre l’arrivo – Potenzialità e criticità della modularità nei rifugi e negli alloggi per gli sfollati | Beyond arrival – On the potential and shortcomings of modularity in shelter and housing for the displaced”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 126-133. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14102023 [Accessed 31 December 2023].

Sposito, C. and De Giovanni G. (2023), “Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 31 December 2023].

Tamborrini, P. and Cretaio, S. (2023), “Relazioni modulari negli spazi di lavoro – Approcci data-driven per progettare il futuro | Modular relations in work environments – Data-driven approaches to design their future”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 284-293. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14242023 [Accessed 31 December 2023].

Tucci, F., Altamura, P. and Pani, M. M. (2023), “Modulare le dinamiche urbane in chiave climatica – Spazi intermedi e neutralità climatica | Modulating urban dynamics from a climate perspective – In-between spaces and climate neutrality”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 204-215. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14172023 [Accessed 31 December 2023].

UN (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, A/RES/70/1. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 31 December 2023].

Valldecabres, J. G. and Besana, D. (2023), “Architetture minime per il paesaggio – Il modulo come strumento per la sostenibilità | Minimal architectures for landscape – The module as a tool for sustainability”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 50-61. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1432023 [Accessed 31 December 2023].

Velo, L. and Cervasato, A. (2023), “Moduli compositivi – Prospettive per antichi patrimoni verso la transizione ecologica | Project modules – Prospects for ancient heritage towards ecological transition”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 116-125. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1492023 [Accessed 31 December 2023].

Villani, P. and Romagnoli, F. (2023), “Modularità e personalizzazione per le cure domiciliari – Configurazione e analisi multicriteri degli arredi | Modularity and customisation for home care – Configuration and multicriteria analysis of furnishings”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 236-249. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14202023 [Accessed 31 December 2023].

Visilia, A.-M. (2023), “I giardini modulari di James C. Rose – La sperimentazione per il Ladies’ Home Journal (1946) | Modular gardens by James C. Rose – A 1946 experiment for Ladies’ Home Journal”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 74-83. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1452023 [Accessed 31 December 2023].

ARTICLE INFO

Received 27 October 2023
 Revised 09 November 2023
 Accepted 11 November 2023
 Published 31 December 2023

AFFRONTARE LA COMPLESSITÀ Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera

DEALING WITH COMPLEXITY Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere

Cesare Sposito, Giuseppe De Giovanni

ABSTRACT

Le modalità con cui viviamo, indipendentemente dal luogo in cui ciò avviene, hanno un impatto sulla biosfera e determinano reazioni a catena in ambiti differenti che influenzano tanto la natura quanto l'essere umano a scala globale: cambiamento climatico, rischi per la salute e perdita della biodiversità concorrono a una condizione di policrisi che amplifica lo stato di incertezza sul nostro futuro e la vulnerabilità dell'intero ecosistema, soprattutto perché le azioni progettuali messe in campo non affrontano la cogente questione ambientale in chiave sistemica e olistica. In quest'ottica il contributo si fa promotore di una integrazione dei tre strumenti di analisi LCA, ERA ed ESA per valutare l'insieme degli impatti e dei benefici delle attività antropiche alle diverse scale spaziali e temporali mettendone in evidenza punti di forza, limiti e criticità, ma anche obiettivi, metodologie di indagine, metriche e percorsi causa-effetto, riferendo con approccio critico anche delle recenti attività di ricerca che hanno tentato una loro combinazione.

How we live, regardless of where this happens, impacts the biosphere and leads to chain reactions in different spheres that affect both nature and humans on a global scale: climate change, health risks, and loss of biodiversity all concur in a polycrisis condition that amplifies the state of uncertainty surrounding our future and the vulnerability of the entire ecosystem, especially since the design actions put in place do not address the cogent environmental issue systemically and holistically. With this in mind, the paper advocates for an integration of LCA, ERA and ESA, three analysis tools, to assess the totality of impacts and benefits of anthropogenic activities at different spatial and temporal scales by highlighting their strengths, limitations and critical issues, but also their objectives, survey methodologies, metrics and cause-effect pathways, critically reporting also on recent research which has attempted their combination.

KEYWORDS

valutazione del ciclo di vita, valutazione del rischio ambientale, valutazione dei servizi ecosistemici, integrazione, approccio olistico e sistemico

life cycle assessment, environmental risk assessment, ecosystem services assessment, integration, holistic and systemic approach

Cesare Sposito, Architect and PhD, is an Associate Professor of Architecture Technology at the Department of Architecture, University of Palermo (Italy). Founding member of Demetra Centro Documentazione e Ricerca Euro-Mediterranea (Ce.Ri.Med.) and the Italian Society of Architectural Technology (SITdA), he is the co-Director of Agathón Journal. His main research focuses are environmental sustainability, innovative materials for architecture, energy conservation in buildings, and the conservation process with a focus on protection systems for archaeological sites. E-mail: cesare.sposito@unipa.it

Giuseppe De Giovanni, Architect, is a Full Professor of Architecture Technology at the Department of Architecture of the University of Palermo (Italy). A member of the SITdA, he is the co-Director of Agathón and President of Demetra Ce.Ri.Med. and Chairman of the Scientific Committee of the National Sustainable Architecture Institute (INSA). His research topics include studying traditional and innovative materials, temporary architecture in emergency, health and recreation, technological and domestic design of homes for the elderly with neurodegenerative diseases, and product design for Design for All. E-mail: giuseppe.degiovanni@unipa.it



■ Affrontare la Complessità è il titolo del volume di Federico Butera (2021) che restituisce con una visione ampia e con dati esaustivi la particolare condizione in cui versa il nostro Pianeta: sebbene abbia un carattere prevalentemente divulgativo, il volume si fonda sui risultati di ricerche scientifiche condotte da Organizzazioni internazionali e studiosi con l'obiettivo di restituire «[...] una realtà profondamente complessa e interconnessa, in cui i fenomeni climatici e ambientali incidono su quelli umani e sociali, e viceversa» (Fioramonti, 2021, p. 9) e far emergere come la biosfera sia governata da un sistema di relazioni e interconnessioni, rispetto alle quali modifiche anche piccole in uno specifico contesto determinano reazioni a catena in ambiti differenti, influenzando tanto la natura quanto l'essere umano a scala globale.

Se in passato l'uomo è stato uno dei tanti fattori che hanno modificato l'ecosistema oggi l'attività antropica è considerata una delle principali cause del cambiamento climatico e dell'innalzamento delle temperature terrestri e marine, a tal punto che l'era in cui viviamo è stata denominata Antropocene (Crutzen and Stoermer, 2000): a partire dalla seconda metà del XVIII secolo le attività dell'uomo e il progresso (scientifico e tecnologico) hanno prodotto effetti tangibili ed esponenzialmente accelerati sulla biosfera, da un lato rendendo precario l'equilibrio del suo ecosistema, dall'altro incidendo su sicurezza, salute, benessere nonché sulla disponibilità di beni e mezzi di sussistenza dei suoi abitanti (Meadows et alii, 1972; Apreda, D'Ambrosio and Di Martino, 2019). Anche Thomas L. Friedman (2016) rileva una condizione in continua ed esponenziale evoluzione: il pianeta che popoliamo già nel 2030 sarà molto diverso da quello che conosciamo perché soggetto alle tre 'forze' della Legge di Moore con la tecnologia, del Mercato con la globalizzazione e di Madre Natura con il cambiamento climatico e la perdita di biodiversità che pressano contemporaneamente sulla biosfera.

La 'complessità' della condizione nella quale ci troviamo è quindi evidente e il cambiamento climatico, secondo Amitav Ghosh (2017), non è un pericolo in sé, ma rappresenta un 'moltiplicatore di minacce' che stressa e amplifica l'instabilità e l'insicurezza già presenti in alcune aree del mondo, incidendo pure sull'economia (Fig. 1). A riprova di ciò due recenti Rapporti restituiscono prospettive a dir poco allarmanti: mentre secondo il World Economic Forum (WEF, 2021), a livello globale, un aumento della temperatura fino a 3,2 °C entro la metà del secolo potrebbe ridurre fino al 18% il PIL mondiale, la World Meteorological Organization (WMO, 2021) riferisce che tra il 1970 e il 2019 le vite umane spente a causa del cambiamento climatico sono state oltre 2 milioni e che soltanto in Europa le morti per caldo estremo potrebbero aumentare da 2.700 a 90.000 ogni anno entro il 2100.

Secondo la Commissione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change delle Nazioni Unite (IPCC, 2018, 2023) causa ed effetto dei suddetti fenomeni sono da ricondurre al costante aumento del surriscaldamento atmosferico che potrebbe comportare un innalzamento delle temperature medie globali di circa 5,8 °C entro la fine del secolo. Nel complesso è evidente che l'impronta ecologica collettiva di molti Paesi abbia già superato notevolmente la relativa 'biocapacità'

(Beyers and Wackernagel, 2019; Fig. 2), una condizione odierna questa che fa sì che la maggior parte dei Paesi industrializzati siano identificati come 'creditori ecologici' (Świąder et alii, 2020).

Rilevano poi Losasso e Verde (2020) come la crisi pandemica da Covid-19 abbia ulteriormente inciso su uno scenario già critico, amplificando i rischi ambientali e generando uno stato di progressiva e inarrestabile 'policrisi', segnalato anche da Morin (2020), che sovraesponde l'intero ecosistema e ne aumenta la vulnerabilità alle catastrofi ambientali. Il recente rapporto del WWF Italia (Pratesi, 2020), che analizza gli effetti delle pandemie sugli ecosistemi, evidenzia infatti come gli impatti biologici e quelli climatico-ambientali tendano a sovrapporsi amplificando gli effetti negativi su diversi tipi di capitale naturale (biodiversità), umano (benessere), sociale (interazioni), culturale (conservazione e valorizzazione) e finanziario (produttività), effetti coerenti con quanto rilevato dall'Alleanza Italiana per lo Sviluppo Sostenibile (ASviS, 2020) che ha effettuato una valutazione quantitativa preliminare del probabile impatto del Covid-19 su oltre 100 indicatori utilizzati per elaborare gli indici compositi dei 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile – SDG (UN, 2015), riscontrando un forte impatto negativo sugli Obiettivi 1 (sconfiggere la povertà), 3 (salute e benessere), 4 (istruzione di qualità), 8 (lavoro dignitoso e crescita economica), 9 (imprese, innovazione infrastrutture) e 10 (ridurre le disuguaglianze) e uno positivo sull'Obiettivo 13 (lotta al cambiamento climatico), grazie al lockdown.

La complessità del tema è tale che a partire dai primi interrogativi sulla liceità per l'uomo di avocare a sé il diritto di controllare la natura (Carson, 1962), con una lenta ma continua presa di coscienza sulla condizione di emergenza prendono corpo nuovi paradigmi, approcci e scienze con i quali si avvia una rivoluzione del pensiero che rivede la posizione dell'uomo rispetto all'ambiente e mette in discussione l'approccio antropocentrico che ha caratterizzato le prime due rivoluzioni industriali (Lauria and Azzalin, 2021).

I Rapporti The Limits of Growth (Meadows et alii, 1972) e Our Common Future (WCED, 1987) aprono la strada a noti e consolidati documenti programmatici che partendo dall'Agenda 21 (UN, 1992), dal pacchetto Clima-Energia 20-20-20 (European Commission, 2009) e dagli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030 (UN – General Assembly, 2015) e attraverso il Piano d'Azione dal titolo Closing the Loop (European Commission, 2015), l'European Green Deal (European Commission, 2019), la Renovation Wave (European Commission, 2020a), il Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020b) e il NextGenerationEU (European Commission, 2020c) arrivano al New European Bauhaus (European Commission, 2021a). Tuttavia lo stato di emergenza sulla questione ambientale permane: la European Environmental Agency (EEA, 2021) rileva che l'auspicato 'disaccoppiamento' della crescita economica dall'utilizzo delle risorse non sta avvenendo e segnala che l'economia circolare potrebbe addirittura incentivare una strategia di crescita con un incremento del consumo di materie non rinnovabili, portando ad esempio l'Unione Europea nella quale durante il 2019 soltanto il 12% circa del materiale è stato riciclato, mentre nel resto del mondo la circolarità è addirittura in calo (Circle Economy, 2021).

Diverse sono le azioni promosse dai documenti programmatici che il mondo scientifico ha restituito con progetti di ricerca su abbattimento dei consumi energetici nelle diverse fasi del processo edilizio, realizzazione di distretti a energia positiva, comunità energetiche, architetture off-grid e strumenti per il monitoraggio dei consumi energetici (Broström, Donarelli and Berg, 2017; Tajima and Nasu, 2020; Gaspari et alii, 2022; Ferrante, Romagnoli and Villani, 2023), su resilienza mitigativa e adattiva alle diverse scale del progetto (Paoletti, 2017; Desmaison et alii, 2019; Tucci et alii, 2022; Andaloro, de Waal and Suurenbroek, 2022; De Joanna, Bronzino and Lusi, 2022; Oliveri, 2022; Tucci and Carlo Ratti Associati, 2023), su circolarità con riciclo di materiali edili, di scarto e da potatura, upcycling di oggetti e tessuti e impiego di materiali da costruzione a base biologica o facilmente riciclabili (Kasper and Stroomer, 2021; Kreissl, 2021; Marji, Shawash and Marji, 2021; Büscher, Polster and Klusmann, 2022; Ferrara and Squatrito, 2022; Romano et alii, 2022; Baratta et alii, 2023, Santos Malaguti de Sousa et alii, 2023).

E ancora, su reversibilità e disassemblaggio di elementi e componenti edilizi (Durmisevic, 2006, 2018, 2019; Baiani and Altamura, 2019; Sposito and Scalisi, 2020; Scalisi and Sposito, 2021; Crippa et alii, 2022) e su infrastrutture verdi e servizi ecosistemici con cataloghi aperti di soluzioni basate sulla natura, strategie per la sottrazione e lo stoccaggio del carbonio in ambito urbano, per la regimentazione delle acque piovane e la mitigazione delle isole di calore, tetti verdi con vegetazione spontanea e a bassa manutenzione e per il paesaggio agrario urbano orizzontale e verticale (Tucci and Giampaletti, 2022; Chaves Coelho Leite, Gobatti and Gamba Huttenlocher, 2022; Valente et alii, 2022; Clemente et alii, 2022; D'Ambrosio, Di Martino and Rigillo, 2022; Cocci Grifoni et alii, 2022; Sommariva, Canessa and Tucci, 2022; Basso et alii, 2022; Bologna and Hasanaj, 2023). Tuttavia le ricerche affrontano specifiche criticità e offrono soluzioni puntuali trascurando di frequente la complessità e la portata degli effetti dell'azione antropica alle diverse scale del costruito.

Una chiave di lettura per affrontare la 'complessità' nel settore edilizio sembra offrirlo il citato New European Bauhaus, un Programma che si propone come 'ponte' tra scienza, tecnologia e arte, avviando un progetto culturale e formativo da strutturare nel settennio 2021-2028 (Scalisi and Ness, 2022); l'obiettivo è la creazione di una 'società a basse emissioni di carbonio, giusta e rigenerativa', con il 'passaggio da un'economia di crescita a un'economia di appartenenza', attraverso una 'progettazione in simbiosi' con la natura. Ciò che caratterizza il Programma è una visione libera dagli schemi tradizionali e anticonformista che, secondo Bason et alii (2020), può fungere da 'vettore' per guidare i cambiamenti necessari, promuovendo una vasta gamma di missioni interconnesse, audaci, ispiratrici e con ampia rilevanza sociale tanto da trasformare un'avanguardia in una 'nuova ondata' di cambiamento sistemico. Tuttavia David Ness (2021) rileva la necessità che in una società post-industriale, per affrontare le sfide dell'emergenza climatica, 'la ragion d'essere' del Nuovo Bauhaus e la sua ambizione ispiratrice si sposino con una minore produzione e consumo garantendo al contempo che

nessuno sia lasciato indietro e si riesca a rispondere alle esigenze dei cittadini in modo meno materiale e 'intensivo'.

Se da un punto di vista concettuale il nuovo Bauhaus apre a una decostruzione e a un ridisegno radicale degli attuali approcci all'architettura, da un punto di vista pragmatico esistono metodi di valutazione degli impatti dell'azione antropica e strumenti informatizzati che fanno parte dell'ampia categoria dei Decision Support Systems e che forniscono supporto decisionale nel valutare le diverse condizioni di progetto attraverso moduli, database e algoritmi funzionali per risolvere complessi problemi qualitativi e quantitativi con un approccio sistemico, individuando le migliori strategie d'intervento, definendo le potenziali alternative e consentendone un'analisi comparativa. Tra quelli consolidati nel panorama internazionale sono da segnalare la Valutazione del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment – LCA), che consente di calcolare i potenziali impatti ambientali (cambiamenti climatici, esaurimento risorse, effetti sull'ecosistema e sulla salute umana) associati a un prodotto, un processo o un sistema lungo il suo ciclo di vita, la Valutazione del Rischio Ambientale (Environmental Risk Assessment – ERA), che mira a valutare i potenziali rischi derivanti dalle attività umane o da eventi catastrofici con danni all'uomo, al paesaggio o all'ecosistema, e infine la Valutazione dei Servizi Ecosistemici (Ecosystem Services Assessment – ESA), che stima il contributo degli ecosistemi al benessere umano quando un'attività antropica si svolge all'interno di un ecosistema.

Tuttavia questi validi strumenti di valutazione, che sono spesso trascurati o peggio ancora sottostimati, restituiscono singolarmente solo una visione parziale degli effetti generati dell'azione dell'uomo sull'ambiente e pertanto non consentono di valutare strategie in grado di affrontare una con-

dizione della biosfera caratterizzata da un complesso sistema di relazioni e interconnessioni, in cui i fenomeni climatici e ambientali incidono su quelli umani e sociali e viceversa, e rispetto alle quali modifiche anche piccole in uno specifico contesto, determinano reazioni a catena in ambiti differenti, influenzando tanto la natura quanto l'essere umano a scala globale.

In tale ottica il saggio ha l'obiettivo di contribuire a future attività di ricerca su una possibile integrazione di LCA, ERA ed ESA in un'unica metodologia che, con approccio sistemico e olistico, possa consentire una valutazione esaustiva degli impatti e dei benefici, alle diverse scale spaziali e temporali, delle attività antropiche nella biosfera. Allo scopo il contributo è strutturato in diverse sezioni: le prime tre introducono le rispettive metodologie di valutazione evidenziandone obiettivi, scale temporali e geografiche di indagine, metriche, percorsi causa-effetto, tipologia di approcci; la quarta sezione evidenzia i punti di forza, i limiti e le criticità di LCA, ERA ed ESA, anche con riferimento a recenti ricerche e a strumenti digitali e database disponibili; la quinta sezione ne analizza differenze e similitudini prevalentemente rispetto a variabilità nello spazio e nel tempo dei fattori di stress e/o dei benefici, valutazioni dell'esposizione aggregate o cumulative, incertezza dei risultati e percorsi della catena causa-effetto; la sesta sezione illustra lo stato dell'arte sulla integrazione di LCA, ERA ed ESA, evidenziando le criticità che possono emergere dalle diverse combinazioni dei sistemi di valutazione; alcune riflessioni su possibili sviluppi futuri concludono lo studio.

Metodologia e limiti dello studio | Lo studio è stato condotto con il metodo della Scoping Review (Arksey and O'Malley, 2005), una metodologia di ricerca che consente di creare una 'map-

patura' della letteratura scientifica disponibile su un tema, e nel caso specifico sulle potenzialità e modalità di integrazione delle valutazioni LCA, ERA ed ESA evidenziandone punti di forza, limiti e criticità. Per analizzare lo stato dell'arte sull'integrazione delle tre metodologie è stato utilizzato il database Scopus, tramite il quale sono state selezionate le ricerche pubblicate nel periodo tra il 1° gennaio 2013 e il 15 settembre 2023; l'indagine è stata condotta inserendo nel database stringhe con le diverse combinazioni dei nomi delle tre metodologie e dei loro acronimi – Life Cycle Assessment, LCA, Ecosystem Services Assessment, ESA, Environmental Risk Assessment, ERA – e selezionando i contributi che rispondevano a tutte e tre le seguenti condizioni: 1) presenza nel titolo di almeno due metodologie e di un riferimento alla loro integrazione; 2) sviluppo di una metodologia di integrazione; 3) applicazione dell'integrazione proposta a un caso studio; 4) testi in lingua inglese.

Nonostante l'approccio metodologico abbia prodotto risultati rilevanti in termini di numero di pubblicazioni e di citazioni ricevute dalle stesse, tra i limiti della ricerca si segnalano l'utilizzo di un unico database, la scelta di parole chiave limitate alla nomenclatura delle tre metodologie di analisi, la selezione di testi in sola lingua inglese e la perimetrazione dello studio all'interno degli ultimi undici anni. Tuttavia i criteri di indagine sono stati attentamente valutati e si ritengono giustificati – per le finalità del presente studio – dal fatto che Scopus e la lingua inglese costituiscono un riferimento per la comunità scientifica internazionale, le combinazioni tra le diverse parole chiave consentono di individuare già dal titolo i contributi di interesse per il presente studio e infine il periodo di riferimento è stato ritenuto adeguato a restituire un'ampia casistica di studi sulle possibili integrazioni delle tre metodologie.

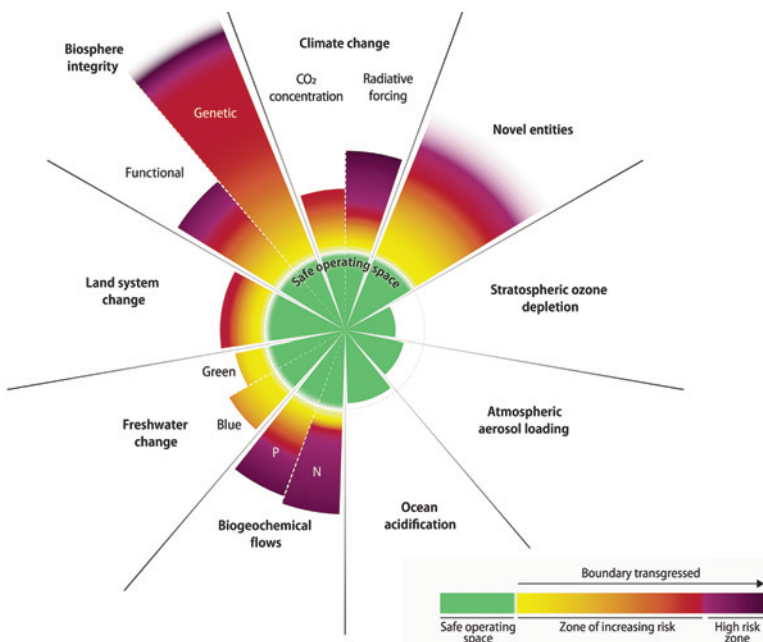


Fig. 1 | Current status of control variables for all nine planetary boundaries: six have been exceeded as ocean acidification approaches its planetary limit. The green zone represents a safe operating space (below the limit); yellow-red represents the zone of increasing risk; purple indicates the high-risk zone, where interglacial Earth system conditions have been largely exceeded. The values of the control variables are normalised so that the origin represents average Holocene conditions, and the planetary boundary (dashed circle) is at the same radius for all boundaries (source: Richardson et alii, 2023).

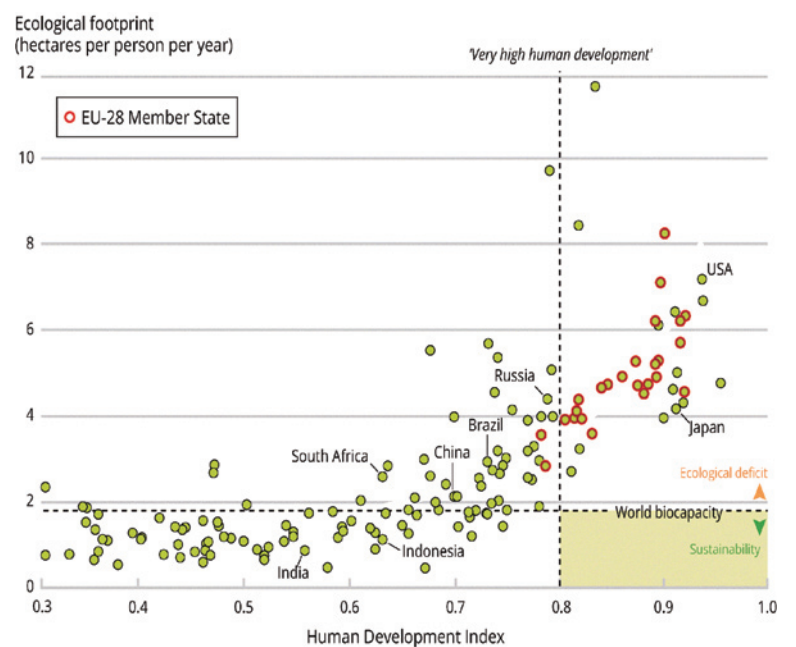


Fig. 2 | Correlation of Ecological Footprint (2008) and the Human Development Index (2012) with SDGI Ranking. Countries that have a footprint within the limits of biocapacity (1.8 ha per capita) do not reach the lower threshold of the human development index (0.7-0.8), and vice versa; countries that have a good human development index (greater than 0.8) all have a footprint above the limit (source: eea.europa.eu).

LCA: Valutazione del Ciclo di Vita | L'obiettivo del raggiungimento di elevate prestazioni dei materiali rispetto agli indicatori ambientali, pur nella complessità del quadro esigenziale al quale il progetto deve rispondere, pone al progetto stesso una duplice sfida. La prima riguarda il rapporto tra progetto e materia: le ricerche attivate in questi anni sul versante dei materiali a base biologica (Sposito and Scalisi, 2019; Violano, Cannaviello and Del Prete, 2021; Mouton, Allacker and Röck, 2023) sono emblematiche della possibilità di progettare le caratteristiche dei materiali non più soltanto dal punto di vista delle prestazioni tecniche – come accaduto con l'avvento dei materiali compositi – ed estetiche, ma anche dal punto di vista delle prestazioni ambientali. La seconda riguarda l'opportunità di ottimizzare i processi di produzione dei materiali al fine di ridurre le fasi più onerose dal punto di vista del consumo delle risorse e degli impatti prodotti (Campioli et alii, 2018), valorizzando le soluzioni 'a basso consumo di energia'. Una scelta appropriata dei materiali da costruzione può favorire una riduzione del 17% dell'energia utilizzata nella costruzione di un edificio (Thormark, 2006) e può ridurre le emissioni di CO₂ del 30% (Gonzalez and Navarro, 2006).

La Valutazione del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment – LCA), i cui primi studi risalgono agli anni '60 e '70 del secolo scorso (Guinée et alii, 2011), è riconosciuta da oltre vent'anni, da quando cioè la European Commission (2003, p. 10) nella Comunicazione sulla Politica Integrata dei Prodotti indicava le valutazioni del ciclo di vita, «[...] the best framework for assessing the potential environmental impacts of products currently available»; stessa considerazione è espressa dalla comunità internazionale (Dodd et alii, 2017).

La modellazione degli impatti ambientali nella LCA si basa su percorsi causa-effetto che collegano specifici fattori di stress ambientale determinati dalle attività umane (emissioni nell'aria, nell'acqua o nel suolo, produzione di rifiuti, estrazione di risorse naturali, ecc.) con uno o più effetti potenziali sull'ambiente che sono classificati in categorie di impatto a livello intermedio e/o finale (danneggiamento) lungo una catena causa-effetto. Esistono diversi metodi quantitativi di Valutazione¹ dell'Impatto del Ciclo di Vita (LCIA), condivisi dalla comunità scientifica internazionale, per quantificare un ampio numero di categorie di impatto e tutti impiegano Fattori di Caratterizzazione (CF) come convertitori di unità per trasformare i flussi d'inventario nell'unità comune dell'indicatore della categoria d'impatto; le categorie di impatto sono collegate a punteggi finali, definiti Aree di Protezione (Areas of Protection – AoPs), che rappresentano le entità da salvaguardare, tradizionalmente riferite ad Ambiente naturale, Salute umana e Risorse naturali ma recentemente estese a Prosperità e Benessere umano (Taelman et alii, 2020).

La LCA è una metodologia standardizzata a livello internazionale dalle norme ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 che descrivono i principi, l'applicazione, le fasi di una LCA, i requisiti, la revisione critica e la valutazione per stimare gli impatti ambientali di beni e servizi tenendo conto dell'intero ciclo di vita del prodotto, dall'estrazione delle materie prime al fine vita (nel caso di un prodotto)²; tuttavia se dal punto di vista teorico l'analisi andrebbe condotta su tutte le fasi del ciclo vita, è possibile, laddove non siano disponibili dati per una

o più fasi del ciclo di vita, optare per un'analisi parziale purché tale scelta (il confine del sistema) sia esplicitata in modo trasparente e sia dichiarata tra i limiti dello studio.

Una metodologia LCA prevede diverse attività (Fig. 3). La prima è la definizione dell'obiettivo e dell'ambito di applicazione alla quale segue quella del Life Cycle Inventory (LCI), l'inventario di input e output di ogni fase del ciclo di vita (dalle materie prime ed energia in ingresso ai prodotti, sottoprodotti, rifiuti, scarichi, emissioni in uscita) che deve essere quantificato; la fase successiva è quella della valutazione dell'impatto (LCIA) nella quale ogni flusso in ingresso e in uscita viene attribuito a una o più categorie d'impatto, cioè le criticità ambientali (cambiamento climatico, riduzione dell'ozono, uso delle risorse, emissione di particolato, ecc.); dopo l'attribuzione i flussi di input e output vengono convertiti, attraverso fattori di caratterizzazione, in impatto potenziale per quella specifica categoria di impatto³; sommando tutti gli input e output di una categoria d'impatto si ottiene un indicatore di impatto potenziale.

ERA: Valutazione del Rischio Ambientale | La Valutazione del Rischio Ambientale (Environmental Risk Assessment – ERA) è un processo di indagine, sviluppato a partire dagli anni '70 e '80 (Aven, 2016), che mira a identificare, analizzare e valutare i potenziali rischi derivanti dalle attività umane⁴ (dall'estrazione di combustibili fossili alla realizzazione di infrastrutture e insediamenti antropici) o da eventi (ad esempio i disastri naturali) che possono causare danni all'uomo (Human Health ERA) e/o a recettori ecologici come animali, piante o un intero ecosistema (Ecological ERA) ed è spesso utilizzata in settori quali la salute e la sicurezza sul lavoro, la sicurezza alimentare e la gestione delle sostanze chimiche. La modellazione degli impatti ambientali nella ERA si basa su percorsi causa-effetto, a partire dall'identificazione di uno specifico fattore di stress fisico e/o biologico e/o chimico che può raggiungere il recettore (entità umana o biologica) attraverso l'aria, l'acqua e/o il suolo; gli effetti dell'esposizione del recettore ai fattori di stress dipenderanno dalla sua durata, frequenza ed entità e gli impatti sono espressi in termini di rischio per i recettori e i loro attributi. Nell'ERA gli Obiettivi di Protezione Specifica (Specific Protection Goals – SPGs), omologhi alle AoPs utilizzate nell'LCA, sono determinati prevalentemente da un sistema normativo nazionale e costituiscono i 'punti finali' della valutazione.

Diverse sono le linee guida promosse a livello internazionale per condurre valutazioni del rischio per la salute umana e/o per i recettori ecologici; ad esempio l'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 2021) le ha redatte per le sostanze chimiche mentre più ampio è il campo di indagine della European Environment Agency (EEA, 1998) che si propone di fornire una panoramica di metodi e applicazioni della valutazione del rischio ambientale nell'Unione Europea per la salute umana e per l'ecosistema ma anche di guidare l'utente a individuare le informazioni rilevanti per le sue esigenze; esistono poi diverse linee guida nazionali tra cui quelle promosse dalla Environment Protection Agency (EPA) degli Stati Uniti per la valutazione del rischio per la salute umana (EPA, 2016b, 2019) e per l'ambiente (EPA, 1998, 2016a). Sebbene le due valutazioni del rischio ambientale pre-

sentino differenze intrinseche, le fasi generali per la conduzione di una valutazione del rischio ambientale sono simili (Fig. 4).

La prima fase consiste nella pianificazione e nell'individuazione di chi o cosa è a rischio, dove si verifica il rischio, quali sono le attività e i fattori di stress ambientale che causano il rischio e quali sono le vie di esposizione. La seconda fase prevede una impostazione differente per le due valutazioni poiché mentre per la salute umana si formula il problema e/o si identificano i pericoli, si collezionano i dati e si identificano i problemi di salute che possono essere causati da un fattore di stress ambientale, per i recettori ecologici si raccolgono i dati e si selezionano gli endpoint per la valutazione, ovvero le componenti ambientali che è importante proteggere e che saranno valutate durante le fasi di analisi e caratterizzazione del rischio. Nella terza fase si analizza il rischio, valutando gli effetti e l'esposizione, attraverso metodi qualitativi e/o quantitativi, per capire se e quanto un certo livello di esposizione a un fattore di stress causerà o meno effetti dannosi, prefigurando diversi scenari di esposizione ed ecologici. Nella quarta fase si caratterizza il rischio, si interpretano i risultati e si determinano le incertezze, mentre nella quinta fase i risultati della valutazione vengono comunicati alle parti interessate affinché possano valutarle e proporre le misure necessarie per la gestione dei rischi.

Per meglio comprendere i rischi potenziali generabili dall'azione antropica sull'ambiente l'ERA viene condotta utilizzando singolarmente e/o combinando diversi metodi qualitativi, semi-quantitativi e/o quantitativi, come illustrato dallo studio di Simons et alii (2017). I metodi qualitativi (interviste, consulenza di esperti, liste di controllo, metodo dei pericoli e dell'operabilità, metodo 'what-if', ecc.) sono solitamente utilizzati per identificare i rischi ma possono essere impiegati anche durante la fase di analisi del rischio quando non è possibile condurre una valutazione quantitativa a causa della scarsa disponibilità di dati o della scarsa conoscenza degli impatti (matrici di rischio, tecniche di ordinamento, ecc.). I metodi semi-quantitativi categorizzano i rischi e i loro impatti attraverso punteggi comparativi mentre le matrici di rischio sono solitamente utilizzate per comunicare i risultati. Infine i metodi quantitativi possono essere ulteriormente suddivisi nelle due grandi categorie degli approcci deterministici e degli approcci probabilistici: mentre i primi sono in grado di calcolare / prevedere eventi di rischio definiti senza alcuna casualità, i secondi ipotizzano eventi futuri considerando i fattori di casualità e di probabilità.

ESA: Valutazione dei Servizi Ecosistemici | Che il cambiamento climatico costituisca una minaccia globale, pervasiva e crescente per la biodiversità e gli ecosistemi è un fatto acclarato dalla letteratura scientifica, così come è accertato che le specie rispondano ai cambiamenti climatici attraverso modifiche (nella morfologia e nel comportamento, nella fenologia e negli spostamenti dalle aree geografiche di riferimento) mediate da risposte adattive ed evolutive (Weiskopf et alii, 2020). Tali risposte, combinate con gli effetti diretti dei cambiamenti climatici e degli eventi calamitosi, determinano sostanziali cambiamenti nella produttività, nelle interazioni tra le specie e nella vulnerabilità alle invasioni biologiche, alterando i benefici e i servizi che gli ecosistemi naturali possono fornire

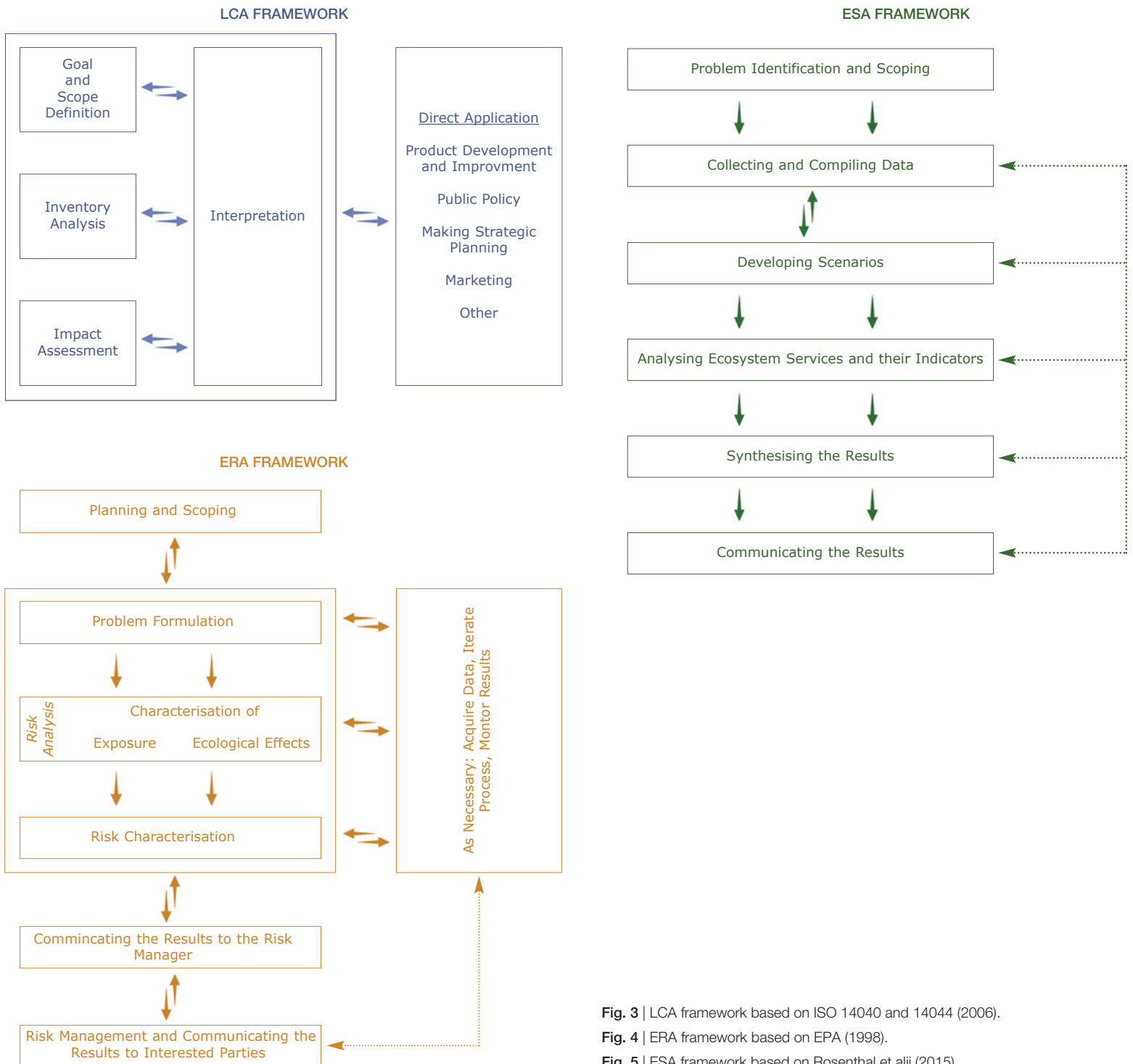


Fig. 3 | LCA framework based on ISO 14040 and 14044 (2006).

Fig. 4 | ERA framework based on EPA (1998).

Fig. 5 | ESA framework based on Rosenthal et alii (2015).

all'uomo e al pianeta. Sebbene gli impatti dei cambiamenti climatici siano diffusi non sono uniformi: le risposte ai cambiamenti climatici variano in funzione di una vulnerabilità dei diversi contesti, legata alle differenze di esposizione, sensibilità e capacità di adattamento (Beever et alii, 2016; Kovach et alii, 2019).

Comunità biologiche diversificate ed ecosistemi 'funzionanti' sono fondamentali per mantenere i servizi ecosistemici che sostengono il benessere umano (Díaz et alii, 2019; Howard et alii, 2017; Crowther, Boddy and Jones, 2011; Runting et alii, 2017) poiché influenzano la disponibilità e l'erogazione dei servizi ecosistemici: 1) di approvvigionamento, ad esempio dell'acqua dolce per le aree antropizzate, l'agricoltura e la produzione di energia elettrica; 2) di regolazione, ad

esempio per il sequestro del carbonio, la mitigazione degli impatti degli eventi estremi, il mantenimento della qualità del suolo e dell'aria, il controllo della diffusione delle malattie, ecc.; 3) di supporto, poiché facilitano le funzioni di base dell'ecosistema, come la produttività primaria, il ciclo dei nutrienti e il mantenimento della diversità genetica; 4) culturali, benefici non materiali che le persone ottengono dalla biodiversità e dagli ecosistemi, come l'identità culturale, le attività ricreative e la salute mentale e fisica.

È da precisare che i processi e le funzioni dell'ecosistema contribuiscono ai servizi ecosistemici ma non sono sinonimi: i processi e le funzioni dell'ecosistema descrivono relazioni biofisiche che esistono indipendentemente dal fatto che gli esseri umani ne traggano o meno beneficio,

mentre i servizi ecosistemici sono quei processi e funzioni che apportano benefici alle persone, consciamente o inconsciamente, direttamente o indirettamente. Il concetto di servizi ecosistemici risale agli anni '70, ma solo negli anni '90 sono stati definiti come flussi di materiali, energia e informazioni provenienti da stock di capitale naturale che si combinano con i servizi prodotti e il capitale umano per apportare benessere all'uomo (Co-stanza et alii, 2017). Il loro riconoscimento è stato tuttavia istituzionalizzato con la pubblicazione del Millennium Ecosystem Assessment delle Nazioni Unite nel 2005 (MEA, 2005) che ha promosso lo sviluppo dei primi quadri di riferimento per la valutazione dei servizi ecosistemici a supporto del processo decisionale rispetto all'uso antropico del suolo e dell'acqua, presentando condizioni, ten-

denze, scenari e opzioni di risposta. A seguire diverse Istituzioni hanno sviluppato altri quadri di riferimento e tra queste il Secretariat of the Convention on Biological Diversity and the United Nations Environment Programme – World Conservation Monitoring Centre (2012), The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB, 2011, 2013), l'Intergovernmental Science-Policy Panel on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES, 2016a, 2016b), l'Ecosystem Services Partnership (de Groot et alii, 2018) e la International Union for Conservation of Nature (Neugarten et alii 2018). La Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) è stata elaborata per l'Agenzia Europea dell'Ambiente con lo scopo finale di mappare i servizi ecosistemici nell'Unione Europea (Haines-Young and Potschin, 2012); tra le caratteristiche della CICES vi sono la gerarchia tra le categorie utilizzate per classificare i servizi ecosistemici – a partire dalle 'sezioni', 'divisioni', 'gruppi' e fino alle 'classi' – per consentire valutazioni ecologiche adeguate ai dati disponibili e una classificazione dettagliata dei servizi ecosistemici che comprende anche output biotici e abiotici, come l'energia rinnovabile, non considerati in altri sistemi di classificazione.

Anche la Commissione Europea ha sviluppato un quadro analitico integrato operativo, basato sulla guida IPBES (2016a, 2016b) e sulla Biodiversity Strategy to 2030 (European Commission, 2020d), per mappare e valutare i cambiamenti di uno stato ecosistemico e dei suoi servizi in Europa i cui risultati sono stati pubblicati in un rapporto tecnico (Maes et alii, 2020). Parallelamente diverse ricerche condotte in ambito accademico hanno prodotto e testato altri sistemi di valutazione dei servizi ecosistemici (Baral, Guariguata and Keenan, 2016; Burkhard et alii, 2018; Koellner et alii, 2019).

La Valutazione dei Servizi Ecosistemici (ESA) è una metodologia orientata agli ecosistemi che valuta il loro contributo, in termini di funzione e valore, al benessere umano attraverso l'erogazione di servizi ecosistemici, evidenziando i compromessi e le sinergie che possono verificarsi tra i servizi stessi quando un'attività umana si svolge all'interno di un ecosistema. Nel complesso la procedura per condurre una valutazione può essere riassunta nelle seguenti fasi (Fig. 5): 1) identificazione del problema e scoping, ovvero definizione e selezione delle parti interessate, tendenze attuali, ecosistemi e servizi, scala della valutazione; 2) raccolta dei dati; 3) costruzione di scenari per valutare futuri alternativi; 4) analisi e quantificazione dei servizi ecosistemici e dei loro indicatori; 5) integrazione o sintesi dei risultati; 6) comunicazione dei risultati per il dibattito e il processo decisionale. I punti finali della valutazione sono i valori dei servizi ecosistemici, che determineranno il livello di protezione necessario per uno o più servizi.

Tra i diversi modelli assunti come riferimento (Costanza et alii, 2017) per valutare i legami e le interazioni tra gli ecosistemi e il benessere umano quello a cascata dei servizi proposto da Haines-Young e Potschin (2010) è stato ampiamente adottato come modello concettuale (Potschin-Young et alii, 2018); tuttavia, il percorso causa-effetto in una ESA non è lineare in termini di determinazione della causa dell'impatto in quanto le cause non sempre sono determinate dall'attività antropica su strutture e su processi biofisici, ma possono anche

scaturire da un cambiamento all'interno di una struttura e di un processo biofisico non correlati all'intervento umano (Gregr et alii, 2020).

Diversi sono anche i metodi (semi)quantitativi e qualitativi per valutare la variabilità dei servizi ecosistemici; secondo Harrison et alii (2018), che ne hanno individuati 27 da altrettanti casi studio, essi possono essere classificati in biofisici (che tengono conto delle strutture e/o dei processi ecosistemici sottostanti), socioculturali (per mezzo di analisi multicriteriali, classificazione delle preferenze, interviste semistrutturate, sondaggi / questionari, ecc.) ed economici (basati su valori di mercato, ma non sempre misurabili a causa della complessità dei servizi ecosistemici e delle loro interazioni con l'uomo). La scelta del metodo è dipendente da una serie di fattori tra cui il contesto decisionale, la scala delle priorità dei servizi ecosistemici e la disponibilità di dati, ma anche la valutazione dei suoi punti di forza e limiti. Tuttavia l'uso di un solo metodo non è sufficiente per affrontare la complessità dei servizi ecosistemici (Dunford et alii, 2018), condizione questa che spesso richiede un confronto tra diversi scenari di progetto che interessano una o più attività antropiche e uno di riferimento individuabile in un 'passato incontaminato' (Carpenter, Bennett and Peterson, 2006) o nell'attuale condizione del contesto d'intervento (Rosenthal et alii, 2015).

LCA, ERA ed ESA: punti di forza, limiti e criticità

La letteratura scientifica degli ultimi vent'anni su LCA, ERA ed ESA è piuttosto copiosa e nell'insieme riesce a restituire un quadro esaustivo su come le tre analisi si caratterizzano per specifici punti di forza e criticità nella valutazione degli impatti ambientali sugli ecosistemi (Tab. 1). Alcune pubblicazioni (Bjørn et alii, 2017; Simmons et alii, 2017; Buckwell et alii, 2018; Harrison et alii, 2018; Potschin-Young et alii, 2018; Taelman et alii, 2020; Van der Biest et alii, 2020; Prado et alii, 2020; Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020; Muanzu, Rothman and Maltby, 2021) più di altre presentano un taglio critico mettendo in evidenza uno o più punti di forza e criticità.

In generale è da rilevare che per ogni valutazione e in ogni fase di un processo di analisi si può annidare una criticità che renda la valutazione poco attendibile: nel citato documento della European Commission (2003) si sottolineava la necessità di disporre di dati più coerenti e di metodologie concordanti. Stesso rilievo è stato espresso anche da due rilevanti documenti (European Commission, 2021b; Eunomia, 2020) laddove si segnala che negli standard esistenti c'è ampio margine di scelta della metodologia che porta all'incomparabilità dei risultati: in sostanza la conduzione di una valutazione è un atto di semplificazione di un sistema complesso che configura scenari 'non sempre realistici' non tanto per la mancanza di correttezza metodologica, quanto per una differente impostazione metodologica e dati di ingresso spesso poco attendibili.

Nella compilazione di un inventario si possono usare infatti dati primari, raccolti in loco attraverso misurazioni, specifici del sistema da analizzare e quindi di migliore qualità, e dati secondari desunti dalla letteratura scientifica o dai database disponibili, meglio se legati a condizioni/processi omologhi; i secondari hanno una minore attendibilità rispetto a quelli primari, pertanto se la categoria in

cui vengono utilizzati è rilevante l'effetto distorsivo sul risultato sarà elevato. In casi eccezionali si possono utilizzare dati terziari, ovvero assunzioni e stime, che rappresentano l'ultimo gradino della scala in termini di qualità delle informazioni; tuttavia, occorre considerare che la qualità dell'analisi dipende dalla qualità di dati che si utilizzano: ad esempio in una LCA il calcolo dell'energia incorporata è oneroso e complesso (Langston and Langston, 2008), richiedendo tempo e una notevole quantità di dati non sempre facilmente disponibili.

In generale i set di dati che influenzano pesantemente i risultati dovrebbero tenere conto della 'rappresentatività' dei fattori 'tempo', 'area geografica' e 'tecnologia'. Rispetto al 'tempo' i dati devono essere rappresentativi dell'anno in corso o in alternativa è necessario verificare se si sono verificati cambiamenti sostanziali che hanno modificato i valori e che quindi possono influenzare i risultati; in relazione alla 'area geografica' i dati devono essere rappresentativi del luogo di studio; infine è necessario che la tecnologia e gli aspetti tecnici impiegati siano rappresentativi del processo analizzato. Altre criticità comuni che si riscontrano nella letteratura scientifica sul tema sono l'ommissione degli obiettivi, ovvero l'esplicitazione di cosa si misura, e la mancata dichiarazione del perimetro (confine) degli studi condotti; tradurre i numeri di input e output raccolti con l'inventario in impatti / benefici potenziali è l'altro passaggio problematico di una valutazione.

Per la LCA, al fine di superare tali criticità, la European Commission ha promosso il metodo dell'Environmental Product Footprint – EPF (European Commission, 2021c) ribadendo che per effettuare uno studio su un prodotto devono essere ottemperati due inderogabili requisiti: 1) la distinta dei materiali deve essere specifica del prodotto di studio; 2) la modellizzazione dei processi di fabbricazione si deve basare su dati specifici dell'impresa e del prodotto. È da rilevare poi che lo stesso documento allarga la visione del concetto di impatto: sebbene non contempli alcuna categoria denominata 'biodiversità' il metodo EPF comprende tuttavia almeno otto categorie di impatto che hanno un effetto sulla biodiversità (cambiamenti climatici, eutrofizzazione delle acque dolci, eutrofizzazione delle acque marine, eutrofizzazione terrestre, acidificazione, uso dell'acqua, uso del suolo, ecotossicità per le acque dolci). In relazione alla rilevanza che assume la biodiversità per numerosi gruppi di prodotti il documento suggerisce che lo studio EPF riporti se la biodiversità è rilevante per il prodotto studiato e, in caso affermativo, individui gli indicatori di biodiversità tra le informazioni ambientali aggiuntive.

Per limitare l'incertezza legata alla qualità dei dati necessari per le analisi, nel 2014 la Commissione Europea ha definito uno standard per la costruzione di una banca dati di LCA, il Life Cycle Data Network⁵, con l'obiettivo di fornire un'infrastruttura aperta per la pubblicazione di dataset (LCI ed LCIA) di diversa provenienza (industria, progetti LCA nazionali, gruppi di ricerca e consulenti) e di qualità garantita in termini di metodologia, documentazione e nomenclatura, mentre a partire dall'aprile 2018 ha predisposto un nuovo registro per ospitare e condividere i pacchetti di dati in linea con il quadro dell'Impronta Ambientale dei Prodotti e delle Organizzazioni. Uno dei database più noti e utilizzati è l'Inventory of Car-

	Characteristics	LCA	ERA	ESA
Spatial Scale	Anthropogenic Activity	Site-specific	Site-specific	Site-specific Sometimes the anthropogenic activity is not defined
		Cause-Effect Chain (Impacts)		
	Global	✓	✓	✓
	Regional	✓	✓	✓
Temporal Scale	Local	✓	✓	✓
	Time-frames (baseline vs. future)	✓	✓	✓
	Static Models	✓	✓	✓
Cause-effect Pathway	Dynamic Models	✓	✓	✓
	Type	Process-oriented	Receptor-oriented	Ecosystem-oriented
	Well-defined Anthropogenic Activity	✓	✓	✓
	Multiple Stressors	✓	✓	✓
	Multiple Cause-Effect Impact Pathways	✓	✓	✓
Type of approach	Linear Casualty	✓	✓	✓
	Positive Effects of Anthropogenic Activities	✓	✓	✓
	Qualitative	NP	✓	✓
Aggregation	Semi-quantitative	NP	✓	✓
	Quantitative	✓	✓	not all ES can be quantified
	Midpoints	✓	NP	NP
Aggregation	Midpoints / Endpoints	✓	✓	✓
	Endpoints / Single Scores	✓	✓	✓

Tab. 1 | LCA, ERA and ESA characteristics with strengths highlighted in green, weaknesses in red, and areas in need of further development in yellow (source: De Luca Peña, 2022; adapted by the Authors).

bon and Energy (ICE) creato da Hammond e Jones (2008) dell'Università di Bath: il metodo di misurazione utilizzato è input / output e il limite del sistema è 'cradle-to-gate'.

Anche ENEA sta sviluppando un progetto simile, Arcadia⁶: l'Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile prevede di sviluppare entro la fine del 2023 una banca dati italiana ad accesso aperto per 15 filiere con fattori di caratterizzazione calcolati sulle realtà italiane con l'obiettivo di: a) facilitare la diffusione della metodologia LCA a livello nazionale e promuovere iniziative di mitigazione degli impatti verso la Pubblica Amministrazione, le imprese, le ONG, le Università e gli Enti di ricerca; b) promuovere e sviluppare iniziative di sviluppo sostenibile ed economia circolare basate su approccio di ciclo di vita coinvolgendo gli stakeholders locali; c) sostenere l'elaborazione e la regolamentazione delle politiche pubbliche; d) promuovere l'acquisizione di etichette ambientali come la citata EPF, il Made Green in Italy e la Environmental Product Declaration (EPD), utilizzabili nell'ambito degli 'appalti verdi' dai diversi operatori pubblici e soggetti privati. Nello specifico il progetto Life MAGIS – MAde Green in Italy Sche-

me⁷, coordinato da ENEA e da poco ultimato, ha promosso una procedura (sviluppo e test delle Regole di Categoria di Prodotto, definizione delle procedure di verifica e comunicazione delle informazioni ambientali) che ha l'obiettivo di valorizzare i prodotti italiani con le migliori prestazioni ambientali affinché siano conosciuti e riconoscibili. I partner e gli stakeholders coinvolti nel progetto hanno sperimentato l'applicazione di Made Green in Italy e della EPF in otto categorie di prodotti italiani (per il settore edilizio soltanto i serramenti in legno) e hanno collaborato per definire linee guida per il calcolo degli impatti ambientali, comunicare la sostenibilità dei prodotti in modo trasparente ad aziende e cittadini e trasferire il proprio approccio e la propria esperienza ad altre filiere e ad altri Paesi.

La EPD è uno degli strumenti più raccomandati per riferire sugli impatti ambientali del ciclo di vita dei materiali da costruzione (Kuittinen and Linkosalmi, 2015). La norma di riferimento è la EN 15804:2012, aggiornata nel 2021, che fornisce le Regole quadro per le Categorie di Prodotto⁸ per la elaborazione delle dichiarazioni ambientali di tipo III per ogni prodotto e servizio nel settore delle costruzioni. La EPD è una certificazione rila-

sciata da un Ente indipendente che ha lo scopo di consentire alle aziende di comunicare i dati ambientali dei prodotti realizzati, ma anche di facilitare il confronto tra le caratteristiche ambientali dei prodotti che soddisfano requisiti funzionali equivalenti e prendono in considerazione gli stessi confini di sistema. Tra le diverse Organizzazioni indipendenti che elaborano le EPDs vale sicuramente la pena citare l'International EPD[®] System e l'IBU-EPD, quest'ultima con un database di soli materiali da costruzione (Sposito and Scalisi, 2019). Se le EPDs fossero utilizzate già nella fase progettuale, oltre alle caratteristiche prestazionali, tecniche ed estetiche interverrebbero a supporto della fase decisionale parametri ambientali quali l'Embodied Energy e l'Embodied Carbon, gli impatti ambientali e le possibili ricadute sulla salute umana ad esempio tramite le Health Product Declaration.

Anche per la ERA sono stati prodotti diversi manuali, documenti guida e database da cui attingere informazioni per condurre la valutazione, sebbene ad oggi siano riferibili prevalentemente a specifiche normative nazionali. Tra i più diffusi sono da citare il database ExpoFacts⁹ del Joint Research Centre, promosso dalla Commissione Europea, che contiene dati e informazioni sia in materia di ambiente e salute pubblica per la valutazione del rischio da esposizione a sostanze chimiche sia sulla popolazione di tutti gli Stati membri dell'UE e del vecchio Continente (31 Paesi in totale) con numerosi link e riferimenti – raccolti in un database online da oltre 120 fonti (banche dati, sistemi informativi di istituti nazionali e organizzazioni internazionali, articoli scientifici, relazioni e indagini) – e le linee guida e gli strumenti (modelli e database) messi a disposizione dall'EPA.¹⁰

Un passo importante verso l'armonizzazione, l'interoperabilità e l'integrazione dei diversi sistemi ERA è rappresentato dallo studio condotto da Reina et alii (2014) i quali, per conto del Joint Research Centre, hanno selezionato otto sistemi di fattori di esposizione a livello mondiale includendo, oltre ai due citati, quelli di Canada, Australia, Cina, Giappone, Corea e Germania, analizzando punti in comune e differenze e individuando venti criteri raggruppati in cinque categorie (gestione del progetto, progettazione e architettura, contenuto dei dati, qualità dei dati e tipi di valori e utilizzo dei dati).

Rispetto alla ESA è da segnalare che la varietà di benefici che possono apportare i singoli interventi basati sulla natura e il riconoscimento della loro importanza hanno favorito la produzione di numerosi documenti e strumenti per valutare i servizi ecosistemici. La scelta dello strumento è legata allo scopo della valutazione, ai risultati richiesti (qualitativi o quantitativi, relativi a un contesto, economici o non) e a questioni operative come competenze, tempo, budget e disponibilità di dati; ogni strumento presenta quindi punti di forza, limiti e output differenti. All'interno dell'ampia gamma degli strumenti a supporto della ESA, i più diffusi sono ARTificial Intelligence for Environment & Sustainability – ARIES¹¹, Co\$ting Nature¹², Ecosystem Services Toolkit – EST¹³, Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs – InVEST¹⁴, Land Utilisation and Capability Indicator – LUCI¹⁵, Multiscale Integrated Model of Ecosystem Services – MIMES¹⁶, Natural Capital Model¹⁷, NEAT Tree Short Tool Reviews¹⁸, Protected Area Benefits Assessment Tool – PA-

BAT¹⁹, Social Values for Ecosystem Services – SoVES²⁰; Tool Assessor promosso dall'Ecosystem Knowledge Network²¹, Toolkit for Ecosystem Service Site-Based Assessment – TESSA²², Urban Nature Navigator²³, ValUES Project Methods Database²⁴ e WaterWorld.²⁵

A titolo esemplificativo si riportano alcune specificità degli strumenti disponibili: ARIES, MIMES, InVEST, Co\$tingNature, WaterWorld e SoVES sono strumenti digitali di modellazione, mentre i primi due possono prevedere scenari e valutazioni di contesto ed economica dei servizi ecosistemici; InVEST è una suite con parametri definiti per la mappatura e la quantificazione dei servizi ecosistemici biofisici o economici in diversi scenari, per i quali l'utente deve semplicemente reperire i dati di input; Co\$tingNature e WaterWorld forniscono i parametri del modello e tutti i dati di input richiesti così che l'utente debba solo specificare un'area di interesse e scegliere tra scenari preselezionati o progettarne uno proprio; SoVES è un'applicazione dipendente da ArcGIS che consente all'utente di identificare, valutare e mappare i valori sociali percepiti che le persone attribuiscono ai Beni culturali e per l'utilizzo della quale si richiede di condurre indagini tra le parti interessate e predisporre dei modelli per gli output di contesto.

Tre strumenti (EST, TESSA e PA-BAT) guidano passo dopo passo gli utenti nella valutazione dei servizi ecosistemici, fornendo esercizi di scoping, fogli di lavoro per acquisire informazioni / indicazioni per la raccolta di dati primari (TESSA, EST) e un workshop con gli stakeholder (PA-BAT, TESSA). Quattro strumenti (EST, PA-BAT, SoVES e TESSA) sono stati progettati per raccogliere informazioni sui servizi ecosistemici sociali e culturali attraverso indagini o workshop con gli stakeholders; ARIES, Co\$ting Nature, InVEST, MIMES, SoVES e WaterWorld forniscono risultati per contesti specifici; i primi quattro, oltre a EST e TESSA, possono stimare anche i valori economici dei servizi ecosistemici; InVEST è l'unico strumento che include modelli sviluppati per molteplici servizi ecosistemici marini e costieri tuttavia, rispetto all'inventario, il più completo appare essere ValUES con le sue 65 soluzioni che possono essere filtrate per scopo, metodo e servizio ecosistemico.

LCA, ERA ed ESA: differenze e similitudini | I tre sistemi di valutazione del ciclo di vita, del rischio ambientale e dei servizi ecosistemici presentano diverse similitudini e differenze rispetto a metodologia di indagine, dati di inventario, risoluzione spaziale e temporale, percorso causa-effetto, tipologia di approccio quantitativo e/o qualitativo e possibilità di aggregazione dei risultati (Fig. 6). Abbiamo già riferito come la LCA sia una metodologia quantitativa capace di restituire gli effetti multipli causati da diversi fattori di stress su scala globale e sia caratterizzata da un'elevata resa quando si considerano l'attività umana e le tecnologie impiegate lungo l'intero ciclo di vita di un prodotto o di un processo. Tuttavia, sebbene prenda in esame molteplici fattori d'impatto, la LCA non indaga aspetti economici ed etico-sociali e può quantificare solo gli impatti potenziali e non quelli effettivi perché i CF trascurano la variabilità nello spazio e nel tempo dei fattori di stress, la loro variazione spaziale e temporale nel funzionamento degli ecosistemi, le implicazioni della variazione nella vulnerabilità delle

specie e le differenze degli effetti nei contesti vicini e lontani relativi ai diversi confini di valutazione. Tali limiti introducono il fattore 'incertezza' nell'inventario, evidenziato anche dalle ISO 14040:2006 e 14044:2006.²⁶

Al contrario l'ERA valuta, in relazione alle risoluzioni spaziali e temporali scelte, l'esposizione dei sistemi ecologici a specifici fattori di stress in uno specifico scenario ambientale, prendendo in esame prevalentemente il peggior caso realistico secondo il principio di precauzione. In quanto metodologia basata sui recettori e finalizzata agli impatti locali, l'ERA presenta dei limiti nella valutazione degli impatti globali, ma anche nella valutazione degli impatti cumulativi dovuti a più fattori di stress poiché, per questi ultimi, si affida prevalentemente a metodi semiquantitativi per collegare il fattore di stress con il recettore umano o ecologico. La ESA si basa su metodi qualitativi e quantitativi per restituire i cambiamenti sia di un ecosistema nello spazio e nel tempo sia dell'offerta e della domanda di servizi ecosistemici che dipendono dai sistemi sociali, culturali ed economici locali, regionali e nazionali.

Nell'ERA gli impatti causati da più fattori di stress su uno o più recettori possono essere determinati per mezzo di valutazioni dell'esposizione aggregate o cumulative (EPA, 2003), permettendo di apprezzare il contributo relativo dei fattori di stress, delle vie di esposizione e delle fonti nell'impatto complessivo al fine di sviluppare le migliori strategie di gestione del rischio; tuttavia queste valutazioni sono alquanto complesse (Stelzenmüller et alii, 2018) e non si può sempre presumere che l'effetto cumulativo di più fattori di stress sia solo additivo (Holsman et alii, 2017).

L'aggregazione dei risultati, utile per confrontare strategie / soluzioni alternative e agevolare la comunicazione dei risultati, costituisce un fattore di criticità anche per la ESA e la LCA. Nella ESA l'aggregazione attraverso parametri economici è una prassi criticata dal mondo scientifico per motivi etici (Sullivan and Hannis, 2017), mentre l'aggregazione dei servizi in un unico valore è difficile

a causa della variabilità dei benefici dei singoli servizi alle diverse scale (Small, Munday and Duran- ce, 2017). Nella LCA la criticità risiede nel fatto che i risultati sono il frutto di una fase di ponderazione nella quale si assegna un peso alle varie categorie d'impatto, in accordo alla loro importanza relativa e quindi alle priorità della valutazione: il risultato finale è un dato 'pesato' e basato su una scala di valori soggettiva. Al riguardo le ISO non forniscono esempi di metodi di ponderazione mentre la ISO 14044:2006 suggerisce che la ponderazione non debba essere utilizzata in studi destinati a essere resi pubblici e con finalità comparative.

Per una migliore comprensione, trasparenza, riproducibilità, robustezza e affidabilità dei risultati, soprattutto nella fase di interpretazione, è necessario condurre una 'valutazione dell'incertezza dei risultati' stessi. Secondo la EPA (2011) le incertezze riguardano i dati, lo scenario e il modello; nello specifico possono avere origine dal dato che viene utilizzato nell'analisi di inventario per rappresentare i flussi elementari nei processi del sistema, nel fattore di caratterizzazione che viene utilizzato nella valutazione degli impatti per la trasformazione dell'inventario in punteggio di impatto ambientale, nelle assunzioni che vengono fatte durante la costruzione del sistema (ad esempio la rappresentatività dei processi che vengono utilizzati nel modello) e/o nelle scelte dei criteri di allocazione e del metodo di valutazione. La ISO 14044: 2006 affronta la criticità evidenziando la necessità di condurre una 'analisi di sensibilità' per identificare le fonti di incertezza più importanti e per verificare come dati, scenario e modello influenzino il risultato finale; sebbene la ISO non raccomandi una metodologia specifica e negli ultimi decenni siano state condotte numerose ricerche sul tema, ancora oggi la maggior parte degli studi trascura l'analisi delle incertezze e lo studio di sensibilità mentre altri prendono in esame l'incertezza solo nei dati dell'inventario (Lloyd and Ries, 2007; Groen et alii, 2017; Igos et alii, 2019).

In quanto metodologia orientata a individuare i benefici, la catena causa-effetto dell'ESA mette

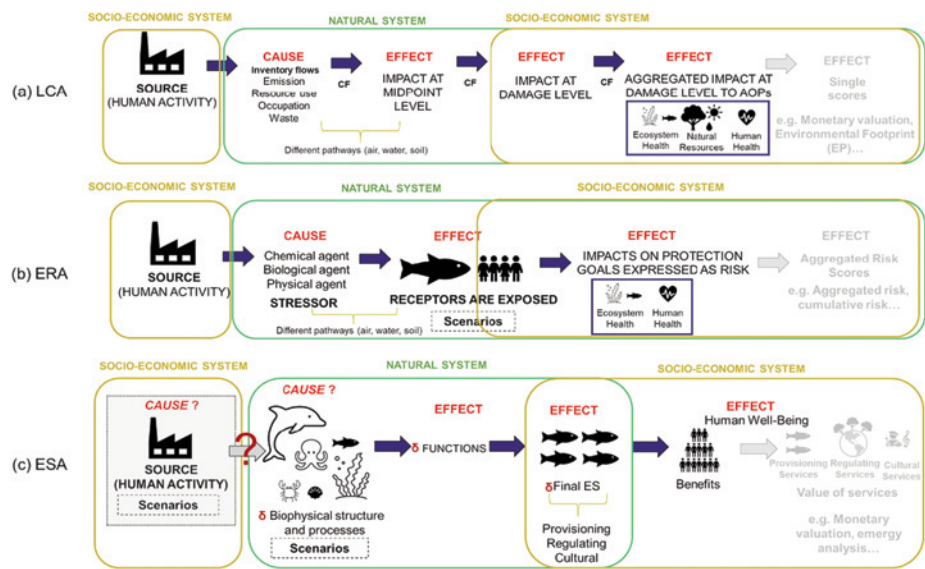


Fig. 6 | Cause-effect chain modelling in LCA, ERA and ESA: yellow boxes include socioeconomic system components; green boxes include natural system components; blue boxes include entities to be protected; grey represents elements that are not always evaluated at the end of cause-effect chains. Causes of ESA do not always originate from the effect of anthropogenic activity on biophysical structures and processes but can also stem from a non-human-related change (source: De Luca Peña, 2022).

Methodologies	Year	Reference Study	SCOPUS Quotes as of 15/09/2023	Integration
LCA - ERA	2014	Barberio, G. Scalbi, S., Buttol, P., Masoni, P. and Righi, S. (2014), "Combining life cycle assessment and qualitative risk assessment – The case study of alumina nanofluid production", in <i>Science of The Total Environment</i> , vol. 496, pp. 122-131. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.135	55	Post-analysis
	2014	Ribera, G., Clarens, F., Martínez-Lladó, X., Jubany, I., Martí, V. and Rovira, M. (2014), "Life cycle and human health risk assessments as tools for decision making in the design and implementation of nanofiltration in drinking water treatment plants", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 466-467, pp. 377-386. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.085	38	Post-analysis
	2014	Walser, T., Juraske, R., Demou, E. and Hellweg, S. (2014), "Indoor exposure to toluene from printed matter matters – Complementary views from life cycle assessment and risk assessment", in <i>Environmental Science and Technology</i> , vol. 48, issue 1, pp. 689-697. doi.org/10.1021/es403804z	36	Post-analysis
	2015	Ayoub, N., Musharavati, F., Pokharel, S. and Gabbar, H. A. (2015), "Risk based life cycle assessment conceptual framework for energy supply systems in large buildings", in <i>Journal of Cleaner Production</i> , vol. 107, pp. 291-309. doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.075	17	Post-analysis
	2015	Kobayashi, Y., Peters, G. M., Ashbolt, N. J., Heimersson, S., Svanström, M. and Khan, S. J. (2015), "Global and local health burden trade-off through the hybridisation of quantitative microbial risk assessment and life cycle assessment to aid water management", in <i>Water Research</i> , vol. 79, pp. 26-38. doi.org/10.1016/j.watres.2015.03.015	25	Combination of results
	2015	Milazzo, M. F. and Spina, F. (2015), "The use of the risk assessment in the life cycle assessment framework – Human health impacts of a soy-biodiesel production", in <i>Management of Environmental Quality An International Journal</i> , vol. 26, issue 3, pp. 389-406. doi.org/10.1108/MEQ-03-2014-0045	14	Complementation of a driving method
	2016	Csiszar, S. A., Meyer, D. E., Dionisio, K. L., Egeghy, P., Isaacs, K. K., Price, P. S., Scanlon, K. A., Tan, Y. M., Thomas, K., Vallero, D. and Bare, J. C. (2016), "Conceptual Framework to Extend Life Cycle Assessment Using Near-Field Human Exposure Modeling and High-Throughput Tools for Chemicals", in <i>Environmental Science and Technology</i> , vol. 50, issue 21, pp. 11922-11934. doi.org/10.1021/acs.est.6b02277	27	Complementation of a driving method
	2016	Harder, R., Peters, G. M., Molander, S., Ashbolt, N. J. and Svanström, M. (2016), "Including pathogen risk in life cycle assessment – The effect of modelling choices in the context of sewage sludge management", in <i>International Journal of Life Cycle Assessment</i> , vol. 21, issue 1, pp. 60-69. doi.org/10.1007/s11367-015-0996-2	25	Complementation of a driving method
	2017	Fransman, W., Buist, H., Kuijpers, E., Walser, T., Meyer, D., Zondervan-van den Beuken, E., Westerhout, J., Klein Entink, R. H. and Brouwer, D. H. (2017), "Comparative Human Health Impact Assessment of Engineered Nanomaterials in the Framework of Life Cycle Assessment", in <i>Risk Analysis</i> , vol. 37, issue 7, pp. 1358-1374. doi.org/10.1111/risa.12703	8	Complementation of a driving method
	2017	Hou, D., Qi, S., Zhao, B., Rigby, M. and O'Connor, D. (2017), "Incorporating life cycle assessment with health risk assessment to select the 'greenest' cleanup level for Pb contaminated soil", in <i>Journal of Cleaner Production</i> , vol. 162, pp. 1157-1168. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.135	78	Combination of results
	2018	Tian, S. and Bilec, M. (2018), "Integrating site-specific dispersion modeling into life cycle assessment, with a focus on inhalation risks in chemical production", in <i>Journal of the Air and Waste Management Association</i> , vol. 68, issue 11, pp. 1224-1238. doi.org/10.1080/10962247.2018.1496189	3	Complementation of a driving method
	2020	Crenna, E., Jolliet, O., Collina, E., Sala, S. and Fantke, P. (2020), "Characterizing honey bee exposure and effects from pesticides for chemical prioritization and life cycle assessment", in <i>Environment International</i> , vol. 138, article 105642, pp. 1-11. doi.org/10.1016/j.envint.2020.105642	37	Complementation of a driving method
	2020	Weyell, P., Kurland, H. D., Hülser, T., Grabow, J., Müller, F. A. and Kralisch, D. (2020), "Risk and life cycle assessment of nanoparticles for medical applications prepared using safe- and benign-by-design gas-phase syntheses", in <i>Green Chemistry</i> , vol. 22, issue 3, pp. 814-827. doi.org/10.1039/c9gc02436k	11	Post-analysis
	2022	Sun, S. and Ertz, M. (2022), "Life Cycle Assessment and Risk Assessment of liquefied natural gas vehicles promotion", in <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , vol. 153, article 111769, pp. 1-13. doi.org/10.1016/j.rser.2021.111769	9	Post-analysis
	2022	Vianello, C., Bassani, A., Mocellin, P., Manenti, F., Pirola, C., Fabiano, B., Colombo, S. and Maschio, G. (2022), "Hybrid risk-based LCA to improve the Acid Gas to Syngas (AG2S™) process", in <i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries</i> , vol. 75, article 104694, pp. 1-11. doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104694	6	Complementation of a driving method

Tab. 2 | List of research that applies anthropogenic action impact analysis to a case study using combined LCA and ERA methodologies (credit: the Authors, 2023).

Next pages

Tab. 3 | List of research studies that apply the analysis of impacts and benefits of anthropogenic action to a case study using combined LCA and ESA methodologies (credit: the Authors, 2023).

Tab. 4 | List of research studies that apply the analysis of impacts and benefits of anthropogenic action to a case study using combined ERA and ESA methodologies (credit: the Authors, 2023).

in relazione la trasformazione delle componenti di un ecosistema al variare dell'offerta e della domanda dei servizi ecosistemici e dei benefici prodotti, cosa che LCA ed ERA non possono valutare da sole, essendo metodologie principalmente orientate all'impatto. Di contro, poiché la ESA è un approccio basato sull'ecosistema le cui modificazioni non sono necessariamente frutto di un'attività umana, questa metodologia da sola non può quantificare gli impatti antropici sui servizi ecosistemici e i loro benefici per il benessere umano su scale diverse senza affidarsi a metodologie di valutazione dell'impatto come LCA e ERA. In generale mentre i percorsi causa-effetto di LCA ed

ERA si concentrano principalmente sulla valutazione degli effetti negativi delle attività antropiche sugli ecosistemi – sebbene per la LCA siano stati condotti studi per l'inclusione del 'handprint concept', ovvero per la contabilizzazione dei potenziali impatti positivi dell'uomo sull'ambiente (Alvarenga et alii, 2020) – quello della ESA è più orientato ai benefici. Rispetto poi alla natura dei percorsi causa-effetto è da rilevare che quelli di ERA ed ESA sono stati criticati perché presuppongono una natura lineare mentre in realtà la causalità nei sistemi socio-ecologici è dinamica (Preiser et alii, 2018). Differenze nel concetto di 'punti finali' sono poi riscontrabili nella LCA e nella ERA: per la prima

essi sono un gruppo di indicatori che esprimono l'impatto di un prodotto / servizio a livello di danno (fine della catena causa-effetto), per la seconda sono i recettori da proteggere; infine elemento comune tra LCA ERA ed ESA è la natura iterativa della metodologia impiegata.

Stato dell'arte sulla integrazione di LCA, ERA ed ESA | Ciascuna delle tre metodologie esposte, con i propri punti di forza e criticità, consente quindi di valutare, a una diversa risoluzione spaziale e temporale, gli impatti negativi dell'azione antropica e/o i benefici dei servizi ecosistemici per l'uomo. Ad oggi però manca una metodologia unica

Methodologies	Year	Reference Study	SCOPUS Quotes as of 15/09/2023	Integration
LCA - ESA	2013	Brandão, M. and i Canals, L. M. (2013), "Global characterisation factors to assess land use impacts on biotic production", in <i>International Journal of Life Cycle Assessment</i> , vol. 18, issue 6, pp. 1243-1252. doi.org/10.1007/s11367-012-0381-3	115	Complementation of a driving method
	2013	Núñez, M., Antón, A., Muñoz, P. and Rieradevall, J. (2013), "Inclusion of soil erosion impacts in life cycle assessment on a global scale – Application to energy crops in Spain", in <i>International Journal of Life Cycle Assessment</i> , vol. 18, issue 4, pp. 755-767. doi.org/10.1007/s11367-012-0525-5	46	Complementation of a driving method
	2013	Saad, R., Koellner, T. and Margni, M. (2013), "Land use impacts on freshwater regulation, erosion regulation, and water purification – A spatial approach for a global scale level", in <i>International Journal of Life Cycle Assessment</i> , vol. 18, issue 6, pp. 1253-1264. doi.org/10.1007/s11367-013-0577-1	94	Complementation of a driving method
	2013	Schaubroeck, T., Alvarenga, R. A. F., Verheyen, K., Muys, B. and Dewulf, J. (2013), "Quantifying the environmental impact of an integrated human/industrial-natural system using life cycle assessment – A case study on a forest and wood processing chain", in <i>Environmental Science and Technology</i> , vol. 47, issue 23, pp. 13578-13586. doi.org/10.1021/es4046633	28	Complementation of a driving method
	2013	Viglia, S., Nienartowicz, A. and Franzese, P. P. (2013), "Integrating Environmental Accounting, Life Cycle and Ecosystem Services Assessment", in <i>Journal of Environmental Accounting and Management</i> , vol. 1, issue 4, pp. 307-319. doi.org/10.5890/JEAM.2013.11.001	15	Post-analysis
	2014	Arbault, D., Rivière, M., Rugani, B., Benetto, E. and Tiruta-Barna, L. (2014), "Integrated earth system dynamic modeling for life cycle impact assessment of ecosystem services", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 472, pp. 262-272. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.099	53	Complementation of a driving method
	2014	Muñoz, I., Flury, K., Jungbluth, N., Rigarlfsford, G., Canals, L. M. and King, H. (2014), "Life cycle assessment of bio-based ethanol produced from different agricultural feedstocks", in <i>International Journal of Life Cycle Assessment</i> , vol. 19, issue 1, pp. 109-119. doi.org/10.1007/s11367-013-0613-1	115	Complementation of a driving method
	2014	Xue, J. F., Liu, S. L., Chen, Z. Du, Chen, F., Lal, R., Tang, H. M. and Zhang, H. L. (2014), "Assessment of carbon sustainability under different tillage systems in a double rice cropping system in Southern China", in <i>International Journal of Life Cycle Assessment</i> , vol. 19, issue 9, pp. 1581-1592. doi.org/10.1007/s11367-014-0768-4	45	Combination of results
	2015	Cao, V., Margni, M., Favis, B. D. and Deschênes, L. (2015), "Aggregated indicator to assess land use impacts in life cycle assessment (LCA) based on the economic value of ecosystem services", in <i>Journal of Cleaner Production</i> , vol. 94, pp. 56-66. doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.041	66	Complementation of a driving method
	2016	Bruel, A., Troussier, N., Guillaume, B. and Sirina, N. (2016), "Considering Ecosystem Services in Life Cycle Assessment to Evaluate Environmental Externalities", in <i>Procedia CIRP</i> , vol. 48, pp. 382-387. doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.143	17	Complementation of a driving method
	2017	Chaplin-Kramer, R., Sim, S., Hamel, P., Bryant, B., Noe, R., Mueller, C., Rigarlfsford, G., Kulak, M., Kowal, V., Sharp, R., Clavreul, J., Price, E., Polasky, S., Ruckelshaus, M. and Daily, G. (2017), "Life cycle assessment needs predictive spatial modelling for biodiversity and ecosystem services", in <i>Nature Communications</i> , vol. 8, article 15065, pp. 1-8. doi.org/10.1038/ncomms15065	69	Complementation of a driving method
	2018	Blanco, C. F., Marques, A. and van Bodegom, P. M. (2018), "An integrated framework to assess impacts on ecosystem services in LCA demonstrated by a case study of mining in Chile", in <i>Ecosystem Services</i> , vol. 30, part B, pp. 211-219. doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.11.011	24	Complementation of a driving method
	2018	Liu, W., Yan, Y., Wang, D. and Ma, W. (2018), "Integrate carbon dynamics models for assessing the impact of land use intervention on carbon sequestration ecosystem service", in <i>Ecological Indicators</i> , vol. 91, pp. 268-277. doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.087	27	Complementation of a driving method
	2018	Jeswani, H. K., Hellweg, S. and Azapagic, A. (2018), "Accounting for land use, biodiversity and ecosystem services in life cycle assessment – Impacts of breakfast cereals", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 645, pp. 51-59. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.088	29	Complementation of a driving method
	2018	van Zelm, R., van der Velde, M., Balkovic, J., Čengić, M., Elshout, P. M. F., Koellner, T., Núñez, M., Obersteiner, M., Schmid, E. and Huijbregts, M. A. J. (2018), "Spatially explicit life cycle impact assessment for soil erosion from global crop production", in <i>Ecosystem Services</i> , vol. 30, part B, pp. 220-227. doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.08.015	21	Complementation of a driving method
	2019	Boone, L., Roldán-Ruiz, I., Van linden, V., Muylle, H. and Dewulf, J. (2019), "Environmental sustainability of conventional and organic farming – Accounting for ecosystem services in life cycle assessment", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 695, article 133841, pp. 1-10. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133841	55	Complementation of a driving method
	2019	Liu, X. and Bakshi, B. R. (2019), "Ecosystem Services in Life Cycle Assessment while Encouraging Techno-Ecological Synergies", in <i>Journal of Industrial Ecology</i> , vol. 23, issue 2, pp. 347-360. doi.org/10.1111/jiec.12755	35	Complementation of a driving method
	2019	Liu, X., Charles, M. and Bakshi, B. R. (2019), "Including ecosystem services in life cycle assessment – Methodology and application to urban farms", in <i>Procedia CIRP</i> , vol. 80, pp. 287-291. doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.004	9	Complementation of a driving method
	2019	Othoniel, B., Rugani, B., Heijungs, R., Beyer, M., Machwitz, M. and Post, P. (2019), "An improved life cycle impact assessment principle for assessing the impact of land use on ecosystem services", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 693, article 133374, pp. 1-15. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.180	31	Complementation of a driving method
	2020	Bragaglio, A., Braghieri, A., Pacelli, C. and Napolitano, F. (2020), "Environmental impacts of beef as corrected for the provision of ecosystem services", in <i>Sustainability</i> , vol. 12, issue 9, article 3828, pp. 1-15. doi.org/10.3390/su12093828	14	Complementation of a driving method
2020	Briones-Hidrovo, A., Uche, J. and Martínez-Gracia, A. (2020), "Determining the net environmental performance of hydropower – A new methodological approach by combining life cycle and ecosystem services assessment", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 712, article 136369, pp. 1-14. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136369	28	Combination of results	
2020	Liu, X., Bakshi, B. R., Rugani, B., de Souza, D. M., Bare, J., Johnston, J. M., Laurent, A. and Verones, F. (2020), "Quantification and valuation of ecosystem services in life cycle assessment – Application of the cascade framework to rice farming systems", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 747, article 141278, pp. 1-10. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141278	21	Complementation of a driving method	
2020	Morales Mora, M. A., Bravo, R. D. M., Baril, C. F., Hernández, M. F. and Delgadillo, S. A. M. (2020), "An integrated approach to determining the capacity of ecosystems to supply ecosystem services into life cycle assessment for a carbon capture system", in <i>Applied Sciences</i> , vol. 10, issue 2, article 622, pp. 1-26. doi.org/10.3390/app10020622	6	Complementation of a driving method	

Methodologies	Year	Reference Study	SCOPUS Quotes as of 15/09/2023	Integration
ESA - ERA	2013	Zhao, Z. and Zhang, T. (2013), "Integration of Ecosystem Services into Ecological Risk Assessment for Implementation in Ecosystem-Based River Management – A Case Study of the Yellow River, China", in <i>Human and Ecological Risk Assessment</i> , vol. 19, issue 1, pp. 80-97. doi.org/10.1080/10807039.2012.683744	13	Complementation of a driving method
	2015	Arkema, K. K., Verutes, G. M., Wood, S. A., Clarke-Samuels, C., Rosado, S., Canto, M., Rosenthal, A., Ruckelshaus, M., Guannel, G., Toft, J., Faries, J., Silver, J. M., Griffin, R. and Guerry, A. D. (2015), "Embedding ecosystem services in coastal planning leads to better outcomes for people and nature", in <i>Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America</i> , vol. 112, issue 24, pp. 7390-7395. doi.org/10.1073/pnas.1406483112	294	Complementation of a driving method
	2015	Cabral, P., Levrel, H., Schoenn, J., Thiébaud, E., Le Mao, P., Mongruel, R., Rollet, C., Dedieu, K., Carrier, S., Morisseau, F. and Daures, F. (2015), "Marine habitats ecosystem service potential – A vulnerability approach in the Normand-Breton (Saint Malo) Gulf, France", in <i>Ecosystem Services</i> , vol. 16, pp. 306-318. doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.09.007	45	Combination of results
	2015	Deacon, S., Norman, S., Nicolette, J., Reub, G., Greene, G., Osborn, R. and Andrews, P. (2015), "Integrating ecosystem services into risk management decisions – Case study with Spanish citrus and the insecticide chlorpyrifos", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 505, pp. 732-739. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.034	28	Complementation of a driving method
	2016	Sample, J. E., Baber, I. and Badger, R. (2016), "A spatially distributed risk screening tool to assess climate and land use change impacts on water-related ecosystem services", in <i>Environmental Modelling and Software</i> , vol. 83, pp. 12-26. doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.05.011	34	Complementation of a driving method
	2016	Xu, X., Yang, G., Tan, Y., Zhuang, Q., Li, H., Wan, R., Su, W. and Zhang, J. (2016), "Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 554-555, pp. 7-16. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.120	131	Complementation of a driving method
	2017	Battista, W., Karr, K., Sarto, N. and Fujita, R. (2017), "Comprehensive Assessment of Risk to Ecosystems (CARE) – A cumulative ecosystem risk assessment tool", in <i>Fisheries Research</i> , vol. 185, pp. 115-129. doi.org/10.1016/j.fishres.2016.09.017	24	Post-analysis
	2017	Gilioli, G., Schrader, G., Carlsson, N., van Donk, E., van Leeuwen, C. H. A., Martín, P. R., Pasquali, S., Vilà, M. and Vos, S. (2017), "Environmental risk assessment for invasive alien species – A case study of apple snails affecting ecosystem services in Europe", in <i>Environmental Impact Assessment Review</i> , vol. 65, pp. 1-11. doi.org/10.1016/j.eiar.2017.03.008	38	Complementation of a driving method
	2017	Pártl, A., Vačkář, D., Loučková, B. and Lorencová, E. K. (2017), "A spatial analysis of integrated risk – Vulnerability of ecosystem services provisioning to different hazards in the Czech Republic", in <i>Natural Hazards</i> , vol. 89, issue 3, pp. 1185-1204. doi.org/10.1007/s11069-017-3015-z	17	Complementation of a driving method
	2017	Syberg, K., Backhaus, T., Banta, G., Bruce, P., Gustavsson, M., Munns, W. R., Rämö, R., Selck, H. and Gunnarsson, J. S. (2017), "Toward a conceptual approach for assessing risks from chemical mixtures and other stressors to coastal ecosystem services", in <i>Integrated Environmental Assessment and Management</i> , vol. 13, issue 2, pp. 376-386. doi.org/10.1002/ieam.1849	12	Complementation of a driving method
	2018	Kang, P., Chen, W., Hou, Y. and Li, Y. (2018), "Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment – A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 636, pp. 1442-1454. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.427	146	Complementation of a driving method
	2019	Culhane, F., Teixeira, H., Nogueira, A. J. A., Borgwardt, F., Trauner, D., Lillebø, A., Piet, G. J., Kuemmerlen, M., McDonald, H., O'Higgins, T., Barbosa, A. L., van der Wal, J. T., Iglesias-Campos, A., Arevalo-Torres, J., Barbière, J. and Robinson, L. A. (2019), "Risk to the supply of ecosystem services across aquatic ecosystems", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 660, pp. 611-621. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.346	51	Combination of results
	2019	Forbes, V. E., Railsback, S., Accolla, C., Birnir, B., Bruins, R. J. F., Ducrot, V., Galic, N., Garber, K., Harvey, B. C., Jager, H. I., Kanarek, A., Pastorok, R., Rebarber, R., Thorbek, P. and Salice, C. J. (2019), "Predicting impacts of chemicals from organisms to ecosystem service delivery – A case study of endocrine disruptor effects on trout", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 649, pp. 949-959. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.344	19	Complementation of a driving method
	2019	Galic, N., Salice, C. J., Birnir, B., Bruins, R. J. F., Ducrot, V., Jager, H. I., Kanarek, A., Pastorok, R., Rebarber, R., Thorbek, P. and Forbes, V. E. (2019), "Predicting impacts of chemicals from organisms to ecosystem service delivery – A case study of insecticide impacts on a freshwater lake", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 682, pp. 426-436. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.187	16	Complementation of a driving method
	2019	Willaert, T., Garcia-Alegre, A. G., Queiroga, H., Cunha e Sá, M. A. and Lillebø, A. I. (2019), "Measuring vulnerability of marine and coastal habitats' potential to deliver ecosystem services – Complex Atlantic region as case study", in <i>Frontiers in Marine Science</i> , vol. 6, pp. 1-13. doi.org/10.3389/fmars.2019.00199	15	Combination of results
	2020	Awuah, K. F., Jegede, O., Hale, B. and Siciliano, S. D. (2020), "Introducing the Adverse Ecosystem Service Pathway as a Tool in Ecological Risk Assessment", in <i>Environmental Science and Technology</i> , vol. 54, issue 13, pp. 8144-8157. doi.org/10.1021/acs.est.9b06851	19	Complementation of a driving method
	2020	Caro, C., Carlos, J., Cunha, P. P. and Teixeira, Z. (2020), "Ecosystem services as a resilience descriptor in habitat risk assessment using the InVEST model", in <i>Ecological Indicators</i> , vol. 115, article 106426, pp. 1-17. doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106426	46	Combination of results
	2020	Xing, L., Hu, M. and Wang, Y. (2020), "Integrating ecosystem services value and uncertainty into regional ecological risk assessment – A case study of Hubei Province, Central China", in <i>Science of the Total Environment</i> , vol. 740, article 140126, pp. 1-12. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140126	60	Complementation of a driving method
	2020	Zhang, H., Feng, J., Zhang, Z., Liu, K., Gao, X. and Wang, Z. (2020), "Regional spatial management based on supply-demand risk of ecosystem services – A case study of the Fenghe River Watershed", in <i>International Journal of Environmental Research and Public Health</i> , vol. 17, issue 11, article 4112, pp. 1-25. doi.org/10.3390/ijerph17114112	9	Complementation of a driving method
	2022	Gärtner, N., Lindhe, A., Wahtra, J., Söderqvist, T., Lång, L.-O., Nordzell, H., Norrman, J. and Rosén, L. (2022), "Integrating Ecosystem Services into Risk Assessments for Drinking Water Protection", in <i>Water</i> , vol. 14, issue 8, article 1180, pp. 1-26. doi.org/10.3390/w14081180	2	Complementation of a driving method
	2022	Huang, X., Wang, X., Zhang, X., Zhou, C., Ma, J. and Feng, X. (2022), "Ecological risk assessment and identification of risk control priority areas based on degradation of ecosystem services – A case study in the Tibetan Plateau", in <i>Ecological Indicators</i> , vol. 141, article 109078, pp. 1-12. doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109078	6	Complementation of a driving method
	2022	Qian, Y., Dong, Z., Yan, Y. and Tang, L. (2022), "Ecological risk assessment models for simulating impacts of land use and landscape pattern on ecosystem services", in <i>Science of The Total Environment</i> , vol. 833, article 155218, pp. 1-12. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155218	35	Complementation of a driving method
2022	Liang, Y. and Song, W. (2022), "Integrating potential ecosystem services losses into ecological risk assessment of land use changes – A case study on the Qinghai-Tibet Plateau", in <i>Journal of Environmental Management</i> , vol. 318, article 115607, pp. 1-15. doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115607	22	Combination of results	
2022	Wu, Y., Gu, C. and Zhang, Y. (2022), "Towards Sustainable Management of Urban Ecological Space – A Zoning Approach Hybridized by Ecosystem Service Value and Ecological Risk Assessment", in <i>Land</i> , vol. 11, issue 8, article 1220, pp. 1-19. doi.org/10.3390/land11081220	3	Combination of results	

che sia in grado di valutare in modo esaustivo l'impronta ecologica complessiva, soprattutto in relazione a un uso multifunzionale degli ecosistemi terrestri e acquatici, sebbene siano già stati condotti degli studi per valutare l'integrazione tra le metodologie LCA, ERA ed ESA con l'obiettivo di superare le singole criticità e valorizzare gli specifici punti di forza (De Luca Peña et alii, 2022).

Per analizzare lo stato dell'arte sull'integrazione delle tre metodologie è stato utilizzato il database Scopus, impiegando le parole chiave, i criteri di selezione e il periodo di riferimento riportati nel paragrafo 'Metodologia e limiti dello studio'. La selezione ha portato a individuare complessivamente 62 studi di cui 15 relativi all'integrazione di LCA ed ERA (Tab. 2), 23 di LCA ed ESA (Tab. 3) e 24 di ERA ed ESA (Tab. 4); non è stato trovato nessuno studio che avesse integrato le tre metodologie in un caso studio.

Dall'analisi dei suddetti studi emerge che l'integrazione tra LCA ed ERA è stata prevalentemente sviluppata aggregando la seconda nella prima attraverso la formulazione di nuovi CF spazialmente differenziati, nuovi percorsi di impatto o modificando le categorie di impatto LCA. Alcuni studi hanno condotto la due valutazioni in modo indipendente mentre altri hanno poi combinato i risultati a livello qualitativo e/o quantitativo; alcuni studi hanno impiegato un'analisi multicriteriale per combinare quantitativamente i risultati di LCA e ERA eseguiti singolarmente sullo stesso caso di studio, mentre altri ancora hanno normalizzato i risultati di LCA e li hanno confrontati con quelli di ERA; lo studio di Ayoub et alii (2015) è l'unico ad aver utilizzato i risultati della LCA per identificare i processi ad alto impatto ambientale nel ciclo di vita di un prodotto e quindi a condurre una valutazione del rischio ambientale basata su tali processi specifici.

Tra le criticità più frequenti che emergono dagli studi, talvolta rilevate dagli stessi autori, si riportano: a) la mancanza di alcuni dati di input; b) la difficoltà di integrare le due metodologie per le differenze che esse presentano nella struttura dei modelli, negli approcci, negli scopi e nelle diverse risoluzioni spaziali e temporali; c) la selezione di percorsi di esposizione adeguati per ridurre le distorsioni nella valutazione soprattutto quando si valutano più fattori di stress contemporaneamente; d) la mancata considerazione dell'intero ciclo di vita nella valutazione. Infine Muazu, Rothman e Maltby (2021) hanno rilevato altre criticità tra cui il rischio di doppi conteggi, possibili incoerenze nella scelta dei parametri e nella modellazione e la mancanza di linee guida e di procedura normate per integrare le due metodologie di indagine.

Anche l'integrazione tra LCA ed ESA è stata prevalentemente sviluppata aggregando la seconda alla prima, spesso considerando i servizi ecosistemici come percorso d'impatto aggiuntivo a quelli tradizionali della LCA e prevedendo CF nel punto medio e nel punto finale differenziati a livello spaziale, così come suggerito dalle linee guida dell'UN Environment Programme and Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Se a livello concettuale diversi contributi esaminati da Koellner et alii (2013) hanno suggerito di ripensare le AoPs della LCA includendo anche i servizi ecosistemici, tra i casi studio analizzati alcuni hanno esteso i confini della LCA con offerta e domanda di servizi ecosistemici, altri hanno proposto l'integrazione del modello a cascata nella LCA, altri ancora hanno utilizzato i flussi LCI integrandovi input di modelli bioeconomici di servizi ecosistemici oppure hanno utilizzato i risultati della LCA per quantificare il valore di un servizio ecosistemico.

Anche questa integrazione tra le due metodologie di valutazione presenta diverse criticità, prima fra tutte la difficoltà di armonizzare le diverse risoluzioni spaziali e temporali dei servizi ecosistemici nella LCA. Altri limiti sono individuabili nella impossibilità di integrare alcuni elementi della ESA nei software LCA disponibili, nella contabilizzazione di servizi ecosistemici a diverse scale, nel rischio di sovrapposizioni e doppi conteggi quando i servizi ecosistemici sono valutati come categorie di impatto, nella disponibilità di dati e nella mancanza di linee guida e di procedura normate per integrare le due metodologie di indagine.

Tra gli studi con ERA ed ESA prevalgono quelli in cui i punti finali della ERA sono stati integrati con i servizi ecosistemici dei quali si riportano il potenziale, i punti di forza e le criticità: attraverso la metodologia dell'EPF è stata collegata una struttura biofisica o le unità fornitrici di servizi con l'offerta dei servizi ecosistemici i quali, in diversi casi, sono stati utilizzati per definire i confini e gli scenari della ERA. Alcuni studi hanno utilizzato lo strumento INVEST con approcci semi-quantitativi per ottenere punteggi sul rischio e sulla fornitura di servizi ecosistemici, grazie al modulo Habitat Risk Assessment (HRA); in alcuni casi i punteggi di rischio ottenuti dalla HRA sono stati aggregati ai punteggi dell'offerta dei servizi ecosistemici per calcolare l'indice di vulnerabilità di uno specifico ecosistema. Altri studi hanno combinato approcci diversi per calcolare il rischio cumulativo sugli ecosistemi e quindi il rischio sulla relativa fornitura di servizi, mentre altri ancora hanno individuato valori economici dei servizi ecosistemici per parametrizzare i punteggi di rischio oppure, al contrario, attraverso i punteggi di rischio hanno determinato il valore, economico e non, dei servizi ecosistemici.

I principali limiti rilevati in questo gruppo di studi sono simili a quelli che sono emersi nell'integrare LCA ed ESA, e tra questi la difficoltà nell'individuare le interconnessioni, le dinamiche e le relazioni tra i servizi ecosistemici e nel collegare più fattori di stress a un singolo servizio ecosistemico. Altre criticità riguardano: a) la selezione di punti finali ERA non rappresentativi di un particolare servizio ecosistemico; b) la monetizzazione di servizi ecosistemici; c) la mancata assegnazione di pesi differenti ai diversi servizi ecosistemici; d) la variabilità di risoluzioni temporali e spaziali quando si vuole tenere conto dell'effetto dei fattori di stress sull'unità di fornitura dei servizi ecosistemici; e) l'utilizzo di un metodo ponderale per la rilevanza dei rischi o dei servizi sistemici; f) la presenza di conflitti di interesse tra gli stakeholders nel determinare i servizi ecosistemici più rilevanti; g) la disponibilità di dati; h) la mancanza di linee guida e di procedura normate per integrare le due metodologie di indagine.

In generale i diversi contributi analizzati mostrano una varietà di approcci che De Luca Peña et alii (2022) hanno classificato in relazione ai punti della catena causa-effetto in cui l'integrazione avviene: il primo tipo di integrazione avviene nella fase di 'post-analisi', pertanto le due metodologie sono condotte indipendentemente l'una dall'altra e i risultati di entrambe sono oggetto di una 'interpretazione qualitativa combinata'; il secondo tipo avviene attraverso la 'combinazione dei risultati', sviluppando le due metodologie indipendentemente l'una dall'altra e combinando / aggregando i risultati in una ulteriore fase quantitativa o qualitativa al termine della catena causa-effetto; il terzo tipo prevede l'integrazione dei risultati attraverso la 'complementazione di un metodo guida' e in questo caso una prima metodologia guida la valutazione e incorpora alcune relazioni della catena causa-effetto della seconda nelle proprie, in alcuni punti o lungo l'intera catena.

Al fine di un futuro studio che miri a integrare i tre metodi di valutazione è da rilevare che ciascuno degli approcci che ha combinato le valutazioni non è risultato esente da criticità: sebbene consentano di catturare gli effetti globali e locali senza dover correlare i risultati da un punto di vista statistico, tutti e tre gli approcci presentano il rischio di doppi conteggi degli impatti e talvolta la 'post-analisi' e la 'combinazione dei risultati' determinano risultati diversi che possono essere di difficile comprensione o addirittura fuorviare i decisori; inoltre richiedono tempi di analisi piuttosto lunghi sia la 'combinazione dei risultati' sia l'integrazione dei risultati attraverso la 'complementazione di un metodo guida' e quest'ultima, pur generando una reale integrazione delle metodologie di analisi, necessita di molti dati la cui assenza condiziona l'incertezza dei risultati.

Riflessioni per una integrazione olistica e sistemica degli strumenti decisionali | Le tre metodologie, pur con le relative criticità, costituiscono validi strumenti decisionali di supporto al progetto, essendo capaci di guidare il progettista nella risoluzione di problemi eccessivamente complessi per l'essere umano e troppo qualitativi per l'elaborazione informatica tradizionale. Tuttavia LCA, ERA ed ESA non sono in grado di affrontare, sia singolarmente che accoppiate, la complessità della condizione 'multirischio' in cui versa il pianeta Terra (Figg. 7, 8), la cui sfida può essere raccolta solo con un approccio al progetto di stampo olistico e sistemico capace di fornire al contempo benefici / servizi ecosistemici e soluzioni per fronteggiare i diversi rischi ambientali e le numerose vulnerabilità dell'ecosistema, mutuando una visione antropocentrica in una 'in simbiosi' con la natura.

Studiosi e filosofi hanno promosso diverse teorie economiche in un'ottica di sviluppo sostenibile e salvaguardia delle generazioni future, dall'Economia della Felicità (Kahneman, 2007) alla Sharing Economy (Botsman and Rogers, 2010), dalla Crescita Qualitativa (Capra and Henderson, 2013) e alla Decrescita Serena (Latouche, 2015; Raworth, 2017), dalla Blue Economy (Pauli, 2009) alla Circular Economy (Ellen MacArthur Foundation, 2010), ma anche approcci progettuali incentrati sulla Biomimicry (Benyus, 1997) e sul Cradle to Cradle e sull'upcycle (McDonough and Braungart, 2002, 2013), sulle '8 R' (Rivalutare, Riconcettualizzare, Ristrutturare, Ridistribuire, Rilocalizzare, Ridurre, Riutare, Riciclare) e sulle sei aree di azione ReSOLVE (REgenerate, Share, Optimise, Loop, Virtualise, Exchange; Ellen MacArthur Foundation 2015), sull'Open Building Habraken (1972) e sui Shearing Layers of Change Brand (1994), sul Design for Disassembly e sul Reversible Building Design (Durmisevic, 2006, 2018), sulla resilienza mi-

tigativa e adattiva del costruito (Tucci and Sposito, 2020) solo per citarne alcuni.

È allora da chiedersi come sia possibile che in presenza di obiettivi condivisi dalle Nazioni Unite, dai singoli Paesi e dalle diverse Organizzazioni internazionali, così come di Programmi strategici con provvidenze finanziarie eccezionali e di strumenti digitali avanzati, le auspiccate transizioni digitale, energetica ed ecologica sono ancora lontane dall'essere realizzate.

Se una prima causa è individuabile nel periodo di incertezza che stiamo vivendo legato alle crisi multiple e interconnesse che hanno caratterizzato gli ultimi quindici anni, a una più attenta riflessione e analisi delle ricerche pubblicate sul tema della sostenibilità nel settore edilizio ci si accorge che le azioni messe in campo sono state prevalentemente finalizzate ad affrontare singoli obiettivi e a risolvere aspetti specifici sulla circolarità dei materiali piuttosto che sulla disassemblabilità dei componenti o ancora sul contenimento dei consumi energetici o su materiali ed elementi adattivi o sull'impiego di soluzioni basate sulla natura, ecc., come se ciascuno di questi aspetti singolarmente fosse in grado di limitare e/o addirittura azzerare gli impatti dell'azione antropica nella biosfera e risolvere l'attuale stato di emergenza ambientale e/o di policrisi.

Questa visione 'miope' è confermata anche dal recentissimo Rapporto sul Global Sustainable Development (IGS, 2023) il quale da un lato riferisce, sulla base dei dati accessibili a maggio 2023, quanto siamo lontani dal raggiungimento dei singoli SDG e sui loro progressi con proiezioni al 2030 e al 2050, dall'altro mostra le limitate interconnessioni tra i 17 SDG e le 136 coppie di Obiettivi (Figg. 9-11), concludendo che le crisi di inizio Millennio possono diventare una opportunità ed essere superate con strategie ampie e inclusive che prendano in esame più obiettivi interconnessi e combinino l'azione locale con la cooperazione internazionale, offrendo spazi d'azione che in precedenza sarebbero sembrati eccessivamente ambiziosi o estremi; lo stesso rapporto conclude con l'auspicio di un maggiore investimento in ricerca e sviluppo ma anche in strumenti scientifici di valutazione predittiva, dati di qualità e metriche economiche e non, capaci di 'restituire' il valore della vita umana e della natura e di monitorare i progressi nel miglioramento del benessere umano, della salvaguardia dell'ambiente e della biodiversità e della fornitura di servizi pubblici.

In quest'ottica il presente contributo, richiamando l'Obiettivo 17 - 'Rafforzare i mezzi di attuazione e rinnovare il partenariato mondiale per lo sviluppo sostenibile' e facendo seguito all'auspicio del citato Rapporto 2023 sul Global Sustainable Development, sostiene la necessità di attivare urgenti azioni di ricerca per una integrazione dei metodi LCA, ERA ed ESA al fine di fornire ai diversi stakeholder uno strumento decisionale che consenta di valutare, ad ampio raggio, non solo come l'uomo influenza gli ecosistemi e i servizi che essi forniscono, ma anche come i sistemi naturali condizionano gli esseri umani, esaminando l'insieme delle interazioni tra i sistemi antropico-produttivi e i sistemi naturali terrestri e marini poiché solo così è possibile comprendere, misurare e quantificare impatti e benefici a più scale.

Allo stato attuale gli sviluppi di questo ambito di ricerca sono piuttosto incerti e ne definiscono

contemporaneamente gli attuali limiti poiché le ricerche sull'integrazione di LCA, ESA ed ERA sono settoriali e spesso basate su intuizioni e non su modelli di tipo scientifico, strumentali, verificabili, confrontabili e replicabili. Per superare tale criticità è auspicabile che le Nazioni Unite al pari di Enti governativi (UN Environment Programme and Society of Environmental Toxicology and Chemistry, World Health Organization, European Environment Agency, Environmental Protection Agency, Joint Research Centre, ENEA, ecc.) e le Organizzazioni internazionali lungimiranti e attive nella ricerca per la salvaguardia del nostro pianeta lancino una call per creare un tavolo tecnico internazionale con i migliori esperti delle tre metodologie LCA, ERA ed ESA al fine di valutare se esistano i presupposti - fermo restando l'attuale indipendenza delle singole metodologie - di una loro integrazione 'post-analisi', con 'combinazione dei risultati' o attraverso la 'complementazione di un metodo guida', oppure se sia necessario valutare una nuova metodologia che, integrando obiettivi, finalità e output delle tre valutazioni, sia in grado di restituire la complessità della suddetta condizione multirischio per l'uomo e l'ambiente superando criticità e limiti esposti nel presente saggio.

In particolare il tavolo tecnico di esperti dovrebbe essere chiamato a: 1) sviluppare una metodologia di valutazione; 2) definire metriche, descrittori statistici, criteri e protocolli condivisi per la raccolta, l'elaborazione e l'analisi dei dati, 3) individuare sia i fattori di caratterizzazione (ambientali, sociali ed economici) e di esposizione sia le aree di protezione rappresentative; 4) valutare le modalità di conduzione della 'analisi di sensibilità' per identificare le fonti di incertezza più importanti; 5) realizzare un database informatico ad accesso aperto per facilitare l'indicizzazione e il reperimento di informazioni sui fattori di esposizione a livello globale, con il coinvolgimento di aziende che potranno mettere a disposizione dati rappresentativi di specifici processi e tecnologie produttive per le proprie aree geografiche; 6) sviluppare uno strumento informatico, di facile uso e implementabile, per la valutazione degli impatti e dei benefici, con particolare riferimento anche a quelli economici ed etico-sociali, capace di sfruttare le potenzialità dell'intelligenza artificiale di elaborazione e di prefigurazione di scenari alternativi; 7) fornire una guida per la selezione e l'uso dei dati in relazione a specifici scenari di esposizione e popolazione di interesse e per l'uso dello strumento digitale di valutazione; 8) promuovere il nuovo strumento digitale e valutarne la possibilità di normare l'obbligatorietà dopo un periodo di sperimentazione e verifica con metodo scientifico.

Se il New European Bauhaus ha indicato la strada per ridisegnare radicalmente i tradizionali approcci 'settoriali' e 'mono obiettivo' del progetto, ponendosi come ponte tra scienza, tecnologia e arte e vettore per guidare cambiamenti epocali, abbiamo ora certamente bisogno di uno strumento di valutazione della sostenibilità che, in chiave olistica e sistemica, sia in grado da un lato di risolvere la complessità delle singole metodologie di analisi (LCA, ERA ed ESA), dall'altro abbia il potenziale di affrontare la complessità della condizione climatico-ambientale in cui ci troviamo, configurando scenari d'azione capaci di contrastare la policrisi, ridurre le molteplici vulnerabilità dell'ecosistema (Figg. 12-15), fornire servizi ecosistemici

per il benessere umano e salvaguardare la biodiversità, rispondendo contemporaneamente al maggior numero possibile di Obiettivi di Sviluppo Sostenibile entro il 2030.

Affrontare la Complessità (lit. Facing Complexity) is the title of Federico Butera's (2021) volume that portrays the particular condition of our Planet through a broad vision and exhaustive data: though mainly informative, the volume is based on the results of scientific research conducted by International Organizations and scholars, with the aim of restoring a profoundly complex and interconnected reality, in which climatic and environmental phenomena affect human and social ones and vice versa (Fioramonti, 2021), and reveal how the biosphere is governed by a system of relationships and interconnections, whereby even small changes in a specific context determine chain reactions in different spheres, affecting both nature and human beings on a global scale.

While in the past humankind has been one of many factors in altering the ecosystem, today, anthropogenic activity is considered one of the main causes of climate change and rising land and sea temperatures, to such an extent that the era in which we live has been labelled the Anthropocene (Crutzen and Stoermer, 2000): since the second half of the eighteenth century, human activities and progress (scientific and technological) have produced tangible and exponentially accelerated effects on the biosphere, causing a precarious ecosystem balance and affecting the security, health, well-being and also the availability of goods and livelihoods of its inhabitants (Meadows et alii, 1972; Aprea, D'Ambrosio and Di Martino, 2019). Thomas L. Friedman (2016) identifies a continuously and exponentially evolving condition: the planet we inhabit will look very different from the one we know as early as 2030, as it is subject to the three 'forces' of Moore's Law with technology, the Market with globalisation, and Mother Nature with climate change and biodiversity loss simultaneously putting pressure on the biosphere.

The 'complexity' of the condition in which we find ourselves is thus evident, and climate change, according to Amitav Ghosh (2017), is not a danger in itself, but represents a 'threat multiplier' that stresses and amplifies the instability and insecurity already present in some areas of the world, while also affecting the economy (Fig. 1). As evidence of this, two recent Reports return alarming prospects, to say the least: while according to the World Economic Forum (WEF, 2021), a global rise in temperature of up to 3.2 °C by mid-century could reduce global GDP by up to 18%, the World Meteorological Organization (WMO, 2021) reports that between 1970 and 2019, more than 2 million lives ended due to climate change and that in Europe alone, deaths from extreme heat could increase from 2,700 to 90,000 each year by 2100.

According to the Commission of the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2018, 2023), cause and effect of the above phenomena can be attributed to the steady increase in atmospheric warming, which could result in a rise in global average temperatures of about 5.8 °C by the end of the century. It is clear that the collective ecological footprint of many countries has

already significantly exceeded their relative 'biocapacity' (Beysers and Wackernagel, 2019; Fig. 2), a condition that today causes most industrialised countries to be identified as 'ecological creditors' (Świąder et alii, 2020).

Losasso and Verde (2020) further note how the Covid-19 pandemic crisis has further impacted an already critical scenario, amplifying environmental risks and generating a state of progressive and unstoppable 'polycrisis', also reported by Morin (2020), which overexposes the entire ecosystem and increases its vulnerability to environmental disasters. The recent WWF Italy report (Pratesi, 2020), which analyses the effects of pandemics on ecosystems, highlights how biological and climate-environmental impacts tend to overlap, amplifying the negative effects on different types of natural (biodiversity), human (well-being), social (interactions), cultural (conservation and enhancement) and financial (productivity) capital, effects consistent with the findings of the Italian Alliance for Sustainable Development (ASviS, 2020), which carried out a preliminary quantitative assessment of the likely impact of Covid-19 on more than 100 indicators used to develop the composite indices of the 17 Sustainable Development Goals – SDGs (UN, 2015), finding a strong negative impact on Goals 1 (no poverty), 3 (good health and well-being), 4 (quality education), 8 (decent work and economic growth), 9 (industry innovation and infrastructure) and 10 (reduced inequality) and a positive one on Goal 13 (climate action), due to lockdown.

The complexity of the issue is such that, building on the initial questions regarding the legitimacy of humans to claim the right to control nature (Carson, 1962), with a slow but continuous awareness of the state of emergency, new paradigms, approaches and sciences take shape, initiating a revolution in thinking that revises the position of humans in relation to the environment and challenges the anthropocentric approach that characterised the first two industrial revolutions (Lauria and Azzalin, 2021).

The Reports *The Limits of Growth* (Meadows et alii, 1972) and *Our Common Future* (WCED, 1987) pave the way for well-known and well-established policy documents that, starting with Agenda 21 (UN, 1992), the Climate-Energy 20-20-20 package (European Commission, 2009) and the Sustainable Development Goals of Agenda 2030 (UN – General Assembly, 2015) and through the Action Plan titled *Closing the Loop* (European Commission, 2015), the European Green Deal (European Commission, 2019), the Renovation Wave (European Commission, 2020a), the Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020b) and the NextGenerationEU (European Commission, 2020c), culminate in the New European Bauhaus (European Commission, 2021a). However, the state of emergency on the environmental issue remains: the European Environmental Agency (EEA, 2021) observes that the sought-after 'decoupling' of economic growth from resource use is not happening, and points out that the circular economy could even incentivise growth strategy with increased consumption of non-renewable materials, citing as an example the case of the European Union, in which only about 12% of material was recycled during 2019, while in the rest of the world circularity is declining (Circle Economy, 2021).

Various actions have been promoted by policy documents, returned by the scientific world through research projects on the reduction of energy consumption at different stages of the building process, the implementation of positive energy districts, energy communities, off-grid architectures and tools for monitoring energy consumption (Broström, Donarelli and Berg, 2017; Tajima and Nasu, 2020; Gaspari et alii, 2022; Ferrante, Romagnoli and Villani, 2023), as well as on mitigative and adaptive resilience at different project scales (Paoletti, 2017; Desmaison et alii, 2019; Tucci et alii, 2022; Andaloro, de Waal and Surenbroek, 2022; De Joanna, Bronzino and Lusi, 2022; Olivieri, 2022; Tucci and Carlo Ratti Associati, 2023), on circularity with recycling of building, waste and pruning materials, on the upcycling of objects and textiles, and on the use of bio-based or easily recyclable building materials (Kasper and Stroemer, 2021; Kreissl, 2021; Marji, Shwash and Marji, 2021; Büscher, Polster and Klusmann, 2022; Ferrara and Squatrito, 2022; Romano et alii, 2022; Baratta et alii, 2023, Santos Malaguti de Sousa et alii, 2023).

Furthermore, on reversibility and disassembly of building elements and components (Durmisevic, 2006, 2018, 2019; Baiani and Altamura, 2019; Sposito and Scalisi, 2020; Scalisi and Sposito, 2021; Crippa et alii, 2022) and green infrastructure and ecosystem services with open catalogues of nature-based solutions, strategies for urban carbon sequestration and storage, stormwater regimentation and heat island mitigation, green roofs with spontaneous and low-maintenance vegetation, and horizontal and vertical urban agricultural landscapes (Tucci and Giampaletti, 2022; Chaves Coelho Leite, Gobatti and Gamba Huttenlocher, 2022; Valente et alii, 2022; Clemente et alii, 2022; D'Ambrosio, Di Martino and Rigillo, 2022; Cocci Grifoni et alii, 2022; Sommariva, Carnessa and Tucci, 2022; Basso et alii, 2022; Bologna and Hasanaj, 2023). However, the research addresses specific critical issues and offers tailored solutions, frequently neglecting the complexity and extent of the effects of human action at different scales of the built environment.

A key to addressing 'complexity' in the building sector seems to come from the aforementioned New European Bauhaus, a Program which aims to act as a 'bridge' between science, technology and art, initiating a cultural and educational project to be structured over the seven years 2021-2028 (Scalisi and Ness, 2022); the goal is the creation of a 'low-carbon, just and regenerative society', with the 'transition from a growth economy to an economy of belonging', through 'design in symbiosis' with nature. The Program's defining feature is a nonconformist vision, free from traditional patterns, which, according to Bason et alii (2020), can act as a 'vector' to drive the required changes, promoting a wide range of interconnected, bold, inspiring missions with broad social relevance to transform a vanguard into a 'new wave' of systemic change. However, David Ness (2021) notes the need for 'the *raison d'être*' of the New Bauhaus and its inspirational ambition to be combined, in a post-industrial society, with less production and consumption while ensuring that no one is left behind and that the needs of citizens are met in a less material and 'intensive' way, to meet the challenges of the climate emergency.

From a conceptual point of view, the new Bauhaus calls for a deconstruction and radical re-design of current approaches to architecture; however, from a pragmatic point of view, there are methods for assessing the impacts of human action and computerised tools that are part of the broad category of Decision Support Systems, providing decision support in the evaluation of different project conditions through functional modules, databases, and algorithms to solve complex qualitative and quantitative problems with a systems approach, identifying the best intervention strategies, defining potential alternatives, and enabling their comparative analysis. Among the internationally established approaches are Life Cycle Assessment (LCA), which calculates the potential environmental impacts (climate change, resource depletion, ecosystem and human health effects) associated with a product, process or system over its life cycle, Environmental Risk Assessment (ERA), which aims to assess potential risks from human activities or catastrophic events with human, landscape or ecosystem damage, and finally Ecosystem Services Assessment (ESA), which estimates ecosystem contributions to human well-being when anthropogenic activity takes place within an ecosystem.

These valuable assessment tools, often overlooked or worse yet underestimated, individually return only a partial view of the effects generated by human action on the environment and, therefore, do not allow for the evaluation of strategies capable of dealing with a condition of the biosphere characterised by a complex system of relationships and interconnections, in which climatic and environmental phenomena affect human and social ones and vice versa, and for which even small changes in a specific context determine chain reactions in different spheres, affecting both nature and human beings on a global scale.

In this perspective, this paper aims to contribute to future research for a possible integration of LCA, ERA and ESA into a single methodology that can systemically and holistically enable a comprehensive assessment of the impacts and benefits, at different spatial and temporal scales, of anthropogenic activities in the biosphere. To this end, the paper is structured into several sections: the first three introduce the respective assessment methodologies highlighting their objectives, temporal and geographic scales of investigation, metrics, cause-effect pathways, and types of approaches; the fourth section highlights the strengths, limitations, and criticalities of LCA, ERA, and ESA, including references to recent research and available digital tools and databases; the fifth section analyses their differences and similarities mainly concerning spatial and temporal variability of stressors and/or benefits, aggregate or cumulative exposure assessments, the uncertainty of results, and cause-effect chain pathways; the sixth section discusses the state of the art on the integration of LCA, ERA, and ESA, highlighting critical issues that may arise from different combinations of assessment systems; considerations on possible future developments conclude the study.

Methodology and limitations of the study | The study was conducted using the Scoping Review method (Arksey and O'Malley, 2005), a research methodology that allows for the 'mapping' of avail-

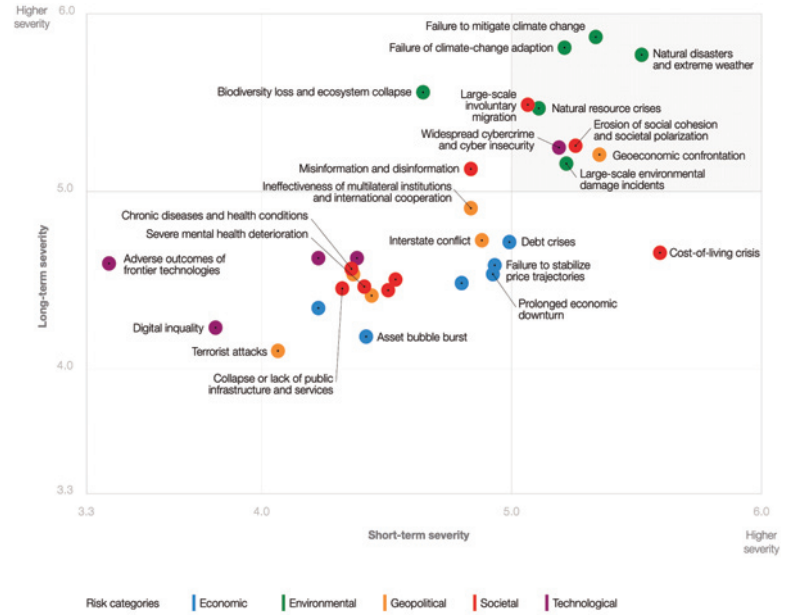
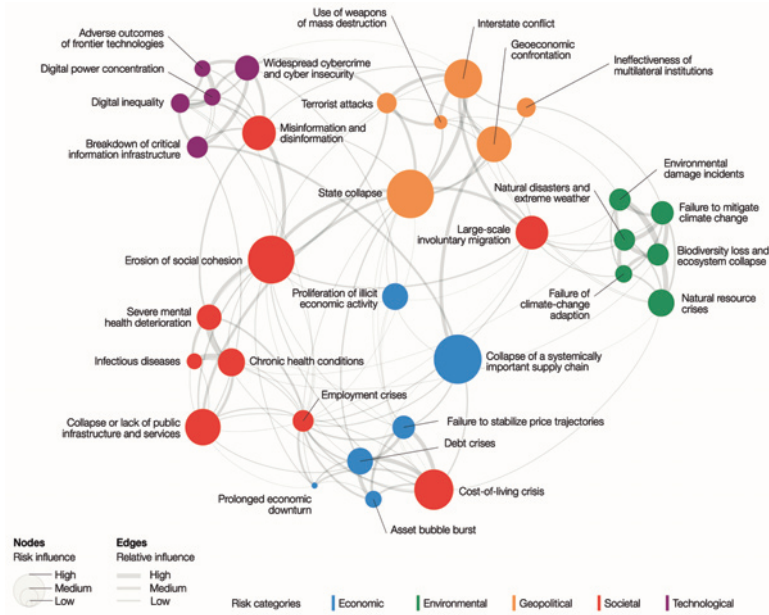


Fig. 7 | Global Risks Landscape – An interconnections map. Concomitant calamitous events, deeply interconnected risks, and loss of resilience are generating a polycrisis condition, in which emergencies of different natures interact in such a way that the total impact far exceeds the sum of each part, with interconnected environmental, geopolitical, and socioeconomic chain effects – globally and in the medium term – relating to the supply and demand for natural resources. Given the uncertain relationships among global risks, similar forecasting exercises can help in anticipating potential connections, directing preparatory measures toward minimising the magnitude and extent of polycrisis before they occur (source: World Economic Forum, Global Risks Perception Survey 2022-2023; WEF, 2023).

Fig. 8 | The Global Risks Perceptions Survey (GRPS) extended over a two-year and ten-year horizon with respect to the economic, environmental, social, geopolitical and technological sectors. The upper right part of the graph indicates the global risks perceived as most serious in both the short and long term. Four environmental risks exhibit deteriorating scores over the 10-year time frame, indicating respondents' concerns about the greater severity of these risks in the long run (source: World Economic Forum, Global Risks Perception Survey 2022-2023; WEF, 2023).

able scientific literature on a topic, and in this specific case on the possibilities and methods for the integration of LCA, ERA and ESA assessments by highlighting their strengths, limitations and critical issues. The Scopus database was used to analyse the state of the art on the integration of the three methodologies, through which research published between January 1, 2013, and September 15, 2023, was selected; the survey was conducted by entering strings in the database containing the different combinations of the names of the three methodologies and their acronyms – Life Cycle Assessment, LCA, Ecosystem Services Assessment, ESA, Environmental Risk Assessment, ERA – and selecting contributions that met all three of the following conditions: 1) presence of at least two methodologies in the title and reference to their integration; 2) development of an integration methodology; 3) application of the proposed integration to a case study; 4) English language texts.

Although the methodological approach produced relevant results in terms of the number of publications and the number of citations received by those publications, research limitations include the use of a single database, the choice of keywords limited to the name of the three analysis methodologies, the selection of English-only texts, and the perimeter of the study within the last eleven years. However, the survey criteria have been carefully evaluated and are considered justified – for the purposes of this study – by the fact that Scopus and the English language constitute a reference for the international scientific community, the combinations between the different keywords make it possible to identify contributions of interest to the present study from the very title, and finally, the reference period is considered sufficient to return a broad case history of studies on the possible integrations of the three methodologies.

LCA: Life Cycle Assessment | The goal of achieving high material performance for environmental indicators, even within the complexity of the demanding framework to which the project must respond, poses a twofold challenge to the project itself. The first concerns the relationship between design and matter: research carried out in recent years in the field of biobased materials (Sposito and Scalisi, 2019; Violano, Cannaviello and Del Prete, 2021; Mouton, Allacker and Röck, 2023) has become emblematic of the possibility of designing the characteristics of materials no longer only from the point of view of technical performance – as was the case with the advent of composite materials – and aesthetic performance, but also from the point of view of environmental performance. The second concerns the opportunity to optimise material production processes to reduce the most resource-consuming steps and the impacts produced (Campioli et alii, 2018), enhancing 'low energy consumption' solutions. An appropriate choice of building materials can facilitate a 17% reduction in energy used in building construction (Thormark, 2006) and can reduce CO₂ emissions by 30% (Gonzalez and Navarro, 2006).

The first Life Cycle Assessment (LCA) studies date back to the 1960s and 1970s (Guinée et alii, 2011); LCA has been acknowledged for over twenty years, since the European Commission (2003, p. 10) in the Communication on Integrated Product Policy indicated life-cycle assessments as «[...] the best framework for assessing the potential environmental impacts of products currently available», as also expressed by the international community (Dodd et alii, 2017).

Environmental impact modelling in LCA is based on cause-effect pathways that link specific environmental stressors determined by human activ-

ities (air, water or soil emissions, waste production, natural resource extraction, etc.) with one or more potential effects on the environment that are classified into intermediate and/or final level impact categories (damage) along a cause-effect chain. There are several quantitative methods of Life Cycle Impact Assessment (LCIA)¹, shared by the international scientific community, to quantify a wide number of impact categories, and all methods employ Characterization Factors (CF) as unit converters to transform inventory flows into the common unit of the impact category indicator; impact categories are linked to final scores, called Areas of Protection (AoPs), which represent the entities to be safeguarded, traditionally referring to the Natural Environment, Human Health and Natural Resources but recently extended to Human Prosperity and Well-being (Taelman et alii, 2020).

LCA is a methodology which is internationally standardised by regulations ISO 14040:2006 and ISO 14044:2006; these regulations describe the principles, application, phases of an LCA, requirements, critical review and evaluation to estimate the environmental impacts of goods and services taking into account the entire life cycle of the product, from the extraction of raw materials to the end of life (in the case of a product)². From a theoretical point of view, the analysis should be carried out on all stages of the life cycle; however, if no data is available for one or more stages of the life cycle, it is possible to opt for a partial analysis provided that this choice (system boundaries) is explained transparently and is declared among research limitations.

An LCA methodology envisages several activities (Fig. 3). The first is objective and scope definition, followed by Life Cycle Inventory (LCI), the inventory of inputs and outputs from each life cycle stage (from raw materials and energy inputs to

products, by-products, wastes, discharges, and emissions outputs) that must be quantified; the next stage is impact assessment (LCIA) in which each input and output stream is attributed to one or more impact categories, i.e., critical environmental issues (climate change, ozone depletion, resource use, particulate emission, etc.); following attribution, the input and output streams are converted, through characterisation factors, into potential impact for that specific impact category³; the sum of all inputs and outputs of an impact category returns a potential impact indicator.

ERA: Environmental Risk Assessment | Environmental Risk Assessment (ERA) is an investigative process, developed starting in the 1970s and 1980s (Aven, 2016), that aims to identify, analyse, and assess potential risks resulting from human activities⁴ (ranging from the extraction of fossil fuels to the construction of anthropogenic infrastructure and settlements) or events (e.g., natural disasters) that may cause harm to humans (Human Health ERA) and/or ecological receptors such as animals, plants, or an entire ecosystem (Ecological ERA) and is often used in areas such as occupational health and safety, food safety, and chemical management. Modelling of environmental impacts in ERA is based on cause-effect pathways, starting with the identification of a specific physical and/or biological and/or chemical stressor that can affect the receptor (human or biological entity) through air, water, and/or soil; the effects of the receptor's exposure to the stressors will depend on its duration, frequency, and magnitude, and the impacts are expressed in terms of risk to the receptors and their attributes. In ERA, the Specific Protection Goals (SPGs), equivalent to the AoPs used in LCA, are mainly determined by a national regulatory system and represent the 'endpoints' of the assessment.

Several internationally promoted guidelines exist for conducting risk assessments of human health and/or ecological receptors; for example, the World Health Organization (WHO, 2021) has drafted guidelines for chemicals, while the European Environment Agency (EEA, 1998) has a broader scope of investigation, aiming to provide an overview of methods and applications of environmental risk assessment in the European Union for human health and for the ecosystem, but also to guide the user in identifying relevant information; there are also several national guidelines including those promoted by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) for human health (EPA, 2016b, 2019) as well as for environmental risk assessment (EPA, 1998, 2016a).

While there are inherent differences between the two environmental risk assessments, the general steps required to conduct an environmental risk assessment are similar (Fig. 4). The first phase involves planning and identifying who or what is at risk, where the risk occurs, what activities and environmental stressors cause the risk, and what are the exposure pathways. The second phase involves a different approach for the two assessments; while for human health the issue is formulated and/or hazards are identified, data is collected, and health problems that may be caused by an environmental stressor are identified, for ecological receptors data is collected and endpoints are selected for assessment, i.e., the environmen-

tal components that are important to protect and that will be assessed during the risk analysis and characterisation phases. In the third stage, risk is analysed, assessing effects and exposure through qualitative and/or quantitative methods, to understand whether and how much a certain level of exposure to a stressor will or will not cause harmful effects, foreshadowing different exposure and ecological scenarios. The fourth stage is where risk is characterised, results are interpreted and uncertainties are determined, and in the fifth stage, the assessment results are communicated to stakeholders for them to evaluate and propose necessary measures for risk management.

To better understand potential risks that can be generated by anthropogenic action on the environment, ERA is conducted both by using individual methods and/or combining different qualitative, semi-quantitative, and/or quantitative methods, as illustrated in the study by Simmons et alii (2017). Qualitative methods (interviews, expert advice, checklists, hazard and operability method, 'what-if' method, etc.) are usually used to identify risks but can also be used during the risk analysis phase when quantitative assessment cannot be conducted due to poor data availability or lack of knowledge of impacts (risk matrices, sorting techniques, etc.). Semi-quantitative methods categorise risks and their impacts through comparative scores, while risk matrices are usually used to communicate results. Finally, quantitative methods can be further divided into the two broad categories of deterministic and probabilistic approaches: while the former can calculate / predict definite risk events without any randomness, the latter hypothesise future events by considering randomness and probability factors.

ESA: Ecosystem Services Assessment | The fact that climate change poses a global, pervasive, and growing threat to biodiversity and ecosystems is established in scientific literature, just as it is established that species respond to climate change through modifications (in morphology and behaviour, phenology, and movement from geographic ranges of reference) mediated by adaptive and evolutionary responses (Weiskopf et alii, 2020). These responses, combined with the direct effects of climate change and disaster events, result in substantial changes in productivity, species interactions, and vulnerability to biological invasion, altering the benefits and services that natural ecosystems can provide for humans and the planet. Although the impacts of climate change are widespread, they are not consistent: responses to climate change vary according to the vulnerability of different contexts, linked to differences in exposure, sensitivity and adaptive capacity (Beever et alii, 2016; Kovach et alii, 2019).

Diverse biological communities and 'functioning' ecosystems are critical to maintaining ecosystem services that support human well-being (Díaz et alii, 2019; Howard et alii, 2017; Crowther, Boddy and Jones, 2011; Runting et alii, 2017) as they influence the availability and delivery of ecosystem services such as: 1) supply, e.g., freshwater for anthropised areas, agriculture, and power generation; 2) regulation, e.g., carbon sequestration, mitigation of impacts of extreme events, maintenance of soil and air quality, control of disease spread, etc.; 3) support, as they facilitate basic

ecosystem functions, such as primary productivity, nutrient cycling, and maintenance of genetic diversity; 4) cultural, non-material benefits that people gain from biodiversity and ecosystems, such as cultural identity, recreation, and mental and physical health.

It should be clarified that ecosystem processes and functions contribute to ecosystem services but are not synonymous: ecosystem processes and functions describe biophysical relationships that exist whether or not humans benefit from them, while ecosystem services are those processes and functions that benefit people, consciously or unconsciously, directly or indirectly. The concept of ecosystem services dates back to the 1970s, but it was not until the 1990s that they were defined as flows of materials, energy and information from natural capital stocks that combine with produced services and human capital to provide human well-being (Costanza et alii, 2017). However, their recognition was made official with the publication of the United Nations Millennium Ecosystem Assessment in 2005 (MEA, 2005), which promoted the development of the first ecosystem services assessment frameworks to support decision-making for anthropogenic land and water use, presenting conditions, trends, scenarios and response options.

Following this, several institutions have developed other frameworks, among which are the Secretariat of the Convention on Biological Diversity and the United Nations Environment Programme – World Conservation Monitoring Centre (2012), The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB, 2011, 2013), the Intergovernmental Science-Policy Panel on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES, 2016a, 2016b), the Ecosystem Services Partnership (de Groot et alii, 2018), and the International Union for Conservation of Nature (Neugarten et alii 2018). The Common International Classification of Ecosystem Services (CI-CES) was developed for the European Environment Agency with the ultimate goal of mapping ecosystem services in the European Union (Haines-Young and Potschin, 2012); the features of CI-CES include the hierarchy among categories used to classify ecosystem services – from 'sections', 'divisions', 'groups', and up to 'classes' – to allow for ecological assessments commensurate with the available data and a detailed classification of ecosystem services that also includes biotic and abiotic outputs, such as renewable energy, not considered in other classification systems.

The European Commission has also developed an operational integrated analytical framework, based on the IPBES guide (2016a, 2016b) and the Biodiversity Strategy to 2030 (European Commission, 2020d), to map and assess changes to the state of an ecosystem and its services in Europe, the results of which have been published in a technical report (Maes et alii, 2020). In parallel, a variety of academic research has produced and tested other ecosystem service valuation systems (Baral, Guariguata and Keenan, 2016; Burkhard et alii, 2018; Koellner et alii, 2019).

Ecosystem Services Assessment (ESA) is an ecosystem-oriented methodology that assesses their contribution, in terms of function and value, to human well-being through the provision of ecosystem services, highlighting the trade-offs and synergies that can occur between services

GOAL	INDICATOR	DISTANCE FROM TARGET (2023) ¹	TREND OF SDG PROGRESS (2023) ²	CHANGE IN TREND OF SDG PROGRESS BETWEEN 2020 AND 2023 ²
1	1.1.1 Eradicate extreme poverty	4	Limited or no progress	Backward
	1.3.1 Implement social protection systems	4	Fair progress but acceleration needed	N/A
2	2.1.2 Achieve food security	4	Deterioration	None
	2.2.1 End malnutrition (stunting)	4	Fair progress but acceleration needed	None
3	3.1.2 Increase skilled birth attendance	1	Fair progress but acceleration needed	Backward
	3.2.1 End preventable deaths under 5	4	Fair progress but acceleration needed	Backward
	3.3.3 End malaria epidemic	4	Limited or no progress	None
	3.b.1 Increase vaccine coverage	4	Deterioration	Backward
4	4.1.2 Ensure primary education completion	4	Limited or no progress	Backward
5	5.3.1 Eliminate child marriage	4	Fair progress but acceleration needed	None
	5.5.1 Increase women in political positions	4	Fair progress but acceleration needed	None
6	6.1.1 Universal safe drinking water	4	Limited or no progress	None
	6.2.1 Universal safe sanitation and hygiene	4	Fair progress but acceleration needed	None
7	7.1.1 Universal access to electricity	4	Fair progress but acceleration needed	Backward
	7.3.1 Improve energy efficiency	4	Fair progress but acceleration needed	None
8	8.1.1 Sustainable economic growth	4	Deterioration	Backward
	8.5.2 Achieve full employment	1	Limited or no progress	None
9	9.2.1 Sustainable and inclusive industrialization	1	Limited or no progress	None
	9.5.1 Increase research and development spending	4	Fair progress but acceleration needed	Forward
	9.c.1 Increase access to mobile networks	1	Substantial progress/on track	None
10	10.4.2 Reduce inequality within countries	4	Fair progress but acceleration needed	N/A
11	11.1.1 Ensure safe and affordable housing	4	Fair progress but acceleration needed	Forward
12	12.2.2 Reduce domestic material consumption	4	Limited or no progress	N/A
	12.c.1 Remove fossil fuel subsidies	4	Deterioration	Backward
13	13.2.2 Reduce global greenhouse gas emissions	4	Deterioration	None
14	14.4.1 Ensure sustainable fish stocks	5	Deterioration	N/A
	14.5.1 Conserve marine key biodiversity areas	4	Limited or no progress	N/A
15	15.1.2 Conserve terrestrial key biodiversity areas	4	Limited or no progress	None
	15.4.1 Conserve mountain key biodiversity areas	4	Limited or no progress	N/A
	15.5.1 Prevent extinction of species	4	Deterioration	None
16	16.1.1 Reduce homicide rates	4	Limited or no progress	Backward
	16.3.2 Reduce unsentenced detainees	4	Deterioration	None
	16.a.1 Increase national human rights institutions	4	Fair progress but acceleration needed	None
17	17.2.1 Implement all development assistance commitments	4	Fair progress but acceleration needed	Forward
	17.8.1 Increase internet use	1	Substantial progress/on track	None
	17.18.3 Enhance statistical capacity	4	Limited or no progress	None

Fig. 9 | Current state of progress toward the sustainable development goals based on a select target. Note 1): Distance from target (2023) and trend of Sustainable Development Goals progress (2023) refer to current level and trend information for the latest available data utilising the calculation methodology from the Sustainable Development Goals 2022 Progress Chart Technical Note. Note 2): To capture the impacts of the Covid-19 pandemic on the progress of the Sustainable Development Goals, a comparison of the trend assessment from the Sustainable Development Goals 2020 Progress Chart and the progress trend of the Goals (2023) was made, with some indicators showing reversal or slowed progress. N/A: trend comparisons unavailable due to: i) lack of trend analysis from insufficient data; ii) indicator not included in the 2020 Progress Chart; or iii) indicator has changed between progress charts (source: UNDESA, 2023; IGS, 2023).

when a human activity takes place within an ecosystem. Overall, the procedure for conducting an assessment can be summarised in the following stages (Fig. 5): 1) problem identification and scoping, i.e., definition and selection of stakeholders, current trends, ecosystems and services, scale of assessment; 2) data collection; 3) scenario building to assess alternative futures; 4) analysis and quantification of ecosystem services and their indicators; 5) integration or synthesis of results; and

6) communication of results for debate and decision-making. The assessment endpoints are the ecosystem service values, which then determine the level of protection needed for one or more services. Among the various models taken as references (Costanza et alii, 2017) to assess links and interactions between ecosystems and human well-being, the service cascade model proposed by Haines-Young and Potschin (2010) has been widely adopted as a conceptual model (Potschin-Young

et alii, 2018); however, the cause-effect pathway in an ESA is not linear in terms of determining the cause of impact as causes are not always determined by anthropogenic activity on biophysical structures and processes, but can also arise from a change within a biophysical structure and process unrelated to human intervention (Gregr et alii, 2020).

Various (semi-)quantitative and qualitative methods are also used to assess the variability of ecosystem services; according to Harrison et alii (2018), who identified 27 methods from as many case studies, they can be classified into biophysical (taking into account the underlying ecosystem structures and/or processes), sociocultural (through multicriteria analysis, preference ranking, semi-structured interviews, surveys / questionnaires, etc.) and economic (based on market values, but not always measurable due to the complexity of ecosystem services and their interactions with humans). The choice of method depends on several factors, including decision context, scale of ecosystem service priorities, and data availability, as well as an assessment of its strengths and limitations. However, the use of only one method is not sufficient to address the complexity of ecosystem services (Dunford et alii, 2018), a condition that often requires a comparison between different project scenarios involving one or more anthropogenic activities and a reference scenario that can be identified in an 'uncontaminated past' (Carpenter, Bennett and Peterson, 2006) or the current condition of the intervening context (Rosenthal et alii, 2015).

LCA, ERA and ESA: strengths, limitations and criticalities

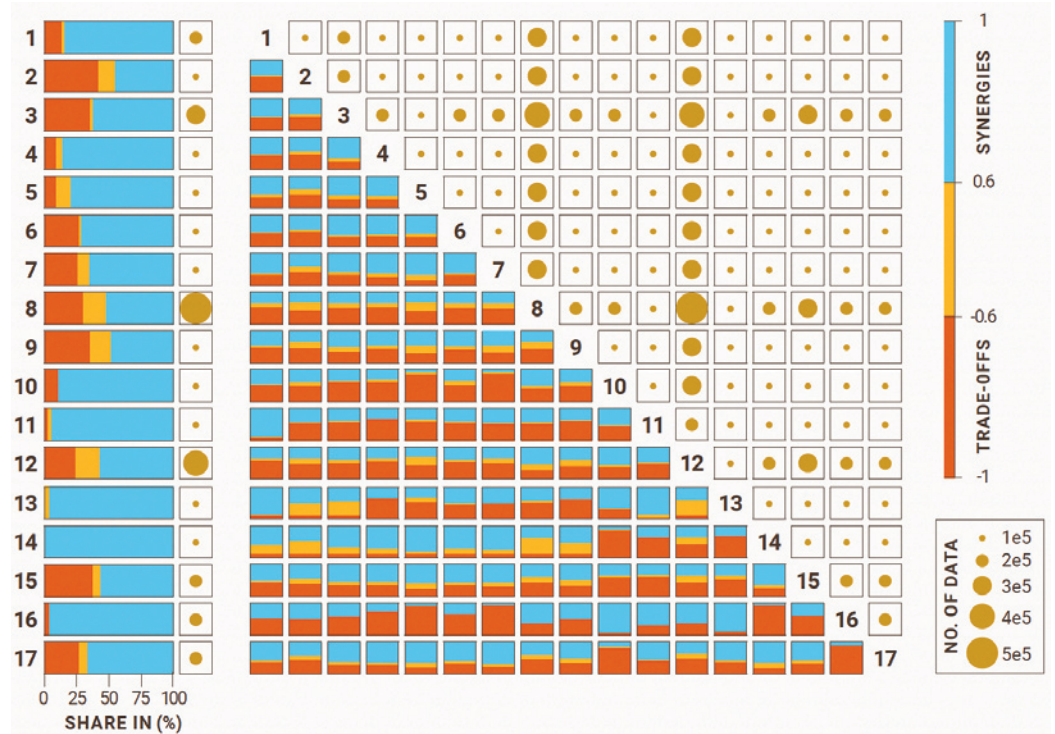
The scientific literature over the past two decades regarding LCA, ERA and ESA is quite extensive and, on the whole, succeeds in returning a comprehensive picture of how the three analyses are characterised by specific strengths and criticalities in assessing environmental impacts on ecosystems (Tab. 1). Some publications (Bjørn et alii, 2017; Simmons et alii, 2017; Buckwell et alii, 2018; Harrison et alii, 2018; Potschin-Young et alii, 2018; Taelman et alii, 2020; Van der Biest et alii, 2020; Prado et alii, 2020; Lueddeckens, Saling and Guenther, 2020; Muazu, Rothman and Maltby, 2021) more than others present a critical angle highlighting one or more strengths and criticalities.

In general, it is worth noting that, for every assessment and at every stage of an analysis process, a lurking critical issue may make the assessment unreliable: the aforementioned European Commission (2003) document emphasised the need for more consistent data and methodologies. The same point was also raised by two relevant documents (European Commission, 2021b; Eunomia, 2020), which note that in existing standards there is ample room for choice of methodology, leading to incomparable results: essentially, conducting an evaluation equates to simplifying a complex system that configures scenarios which are 'not always realistic', not so much because of a lack of methodological accuracy, but rather due to a different methodological approach and often unreliable input data.

In compiling an inventory, it is possible to use primary data, collected on-site through measurements, specific to the system to be analysed and



Fig. 10 | Interlinkages between the Sustainable Development Goals create synergies and trade-offs. Results from an illustrative study of interlinkages between the SDGs. Note: Interactions within the 17 Goals (left) and among 136 pairs of Goals (right) based on data from 2018 (Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division 2019). The shares of synergies (light blue), non-classifieds (yellow), and trade-offs (orange) are represented by the colour bars. The number of data pairs of Sustainable Development Goal indicators is depicted by the areas of the circle in the boxes. Here, 1e5, 2e5, 3e5, 4e5, and 5e5 are 100, 1,000, 10,000, 100,000, and 500,000, respectively (source: Anderson et alii, 2022; IGS, 2023).



therefore of better quality, and secondary data drawn from scientific literature or available databases, preferably related to comparable conditions / processes; secondary data is less reliable than primary data, therefore, if the category in which the data is used is relevant, the results will be heavily distorted. In exceptional cases, tertiary data – such as assumptions and estimates – can be used, though this represents the bottom of the ladder in terms of information quality. However, it is generally necessary to consider that the quality of the analysis depends on the quality of underlying data: for example, in an LCA the calculation of embodied energy is burdensome and complex (Langston and Langston, 2008), requiring time and a considerable amount of data that is not always readily available.

Typically, data sets that heavily influence results should take into account the ‘representativeness’ of ‘time’, ‘geographical area’ and ‘technology’ factors. Concerning ‘time’, data must be representative of the current year, or, alternatively, it is necessary to check whether there have been any substantial changes that have altered any values and thus may influence the results; concerning ‘geographic area’, data must be representative of the study location; and finally, the employed technology and technical aspects must be representative of the analysed process. Other common issues observed in the relevant scientific literature are the omission of objectives, i.e., explicitly stating what is being measured, and the failure to declare the study perimeter (boundary); translating the numbers of inputs and outputs collected with the inventory into potential impacts / benefits is the other challenging step in an evaluation.

To overcome these critical issues for LCA, the European Commission has promoted the Environmental Product Footprint – EPF method (European Commission, 2021c) by stressing that, to conduct a product study, two mandatory requirements must be met: 1) the bill of materials must be specific to the product being studied; and 2)

the modelling of manufacturing processes must be based on data specific to the company and the product. It is also worth noting that the same document expands the concept of impact: although it does not cover any category referred to as ‘biodiversity’, the EPF method nevertheless includes at least eight categories of impact that affect biodiversity (climate change, freshwater eutrophication, marine water eutrophication, terrestrial eutrophication, acidification, water use, land use, freshwater ecotoxicity). Regarding the relevance of biodiversity to many product groups, the document suggests that the EPF study should report whether biodiversity is relevant to the product studied and, if so, should identify biodiversity indicators among the additional environmental information.

To limit the uncertainty associated with the quality of data needed for analysis, in 2014, the European Commission defined a standard for building an LCA database, the Life Cycle Data Network⁵ aimed at providing an open infrastructure for publishing datasets (LCI and LCIA) from different sources (industry national LCA projects, research groups, and consultants), quality-assured in terms of methodology, documentation, and nomenclature. As of April 2018, the Commission also set up a new registry to host and share datasets in line with the Product and Organization Environmental Footprint framework. One of the most well-known and widely used databases is the Inventory of Carbon and Energy (ICE) established by Hammond and Jones (2008) of the University of Bath, which uses an input / output measurement method and a ‘cradle-to-gate’ system limitation.

ENEA is also developing a similar project, Arcadia⁶: The Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development plans to develop an Italian open-access database for 15 supply chains with characterisation factors calculated on Italian realities by the end of 2023 with the aim of: a) facilitating the

dissemination of LCA methodology at a national level and promoting impact mitigation initiatives aimed at Public Administration, businesses, NGOs, Universities and Research Institutions; b) promoting and developing sustainable development and circular economy initiatives based on life cycle approach involving local stakeholders; c) supporting the development and regulation of public policies; d) promoting the acquisition of environmental labels such as the aforementioned EPF, Made Green in Italy and Environmental Product Declaration (EPD), which can be used in ‘green procurement’ by various public operators and private entities. Specifically, project Life MAGIS – Made Green in Italy Scheme⁷, coordinated by ENEA and recently completed, promoted a procedure (development and testing of Product Category Rules, definition of procedures for verification and communication of environmental information) that aims to enhance Italian products with the strongest environmental performance to ensure they are well-known and recognisable. Partners and stakeholders involved in the project tested the application of Made Green in Italy and the EPF in eight Italian product categories (for the building sector, only wooden windows and doors) and collaborated to define guidelines for the calculation of environmental impacts, communicate product sustainability transparently to companies and citizens, and transfer their approach and experience to other supply chains and countries.

EPD is one of the most recommended tools used to report on the life cycle environmental impacts of building materials (Kuittinen and Linkosalmi, 2015). The reference regulation is EN 15804: 2012, as amended in 2021, which provides the Framework Rules for Product Categories⁸ for the development of Type III environmental declarations for each product and service in the construction sector. The EPD certification is issued by an independent body and aims to enable companies to communicate environmental data of manufactured products but also to facilitate comparison of

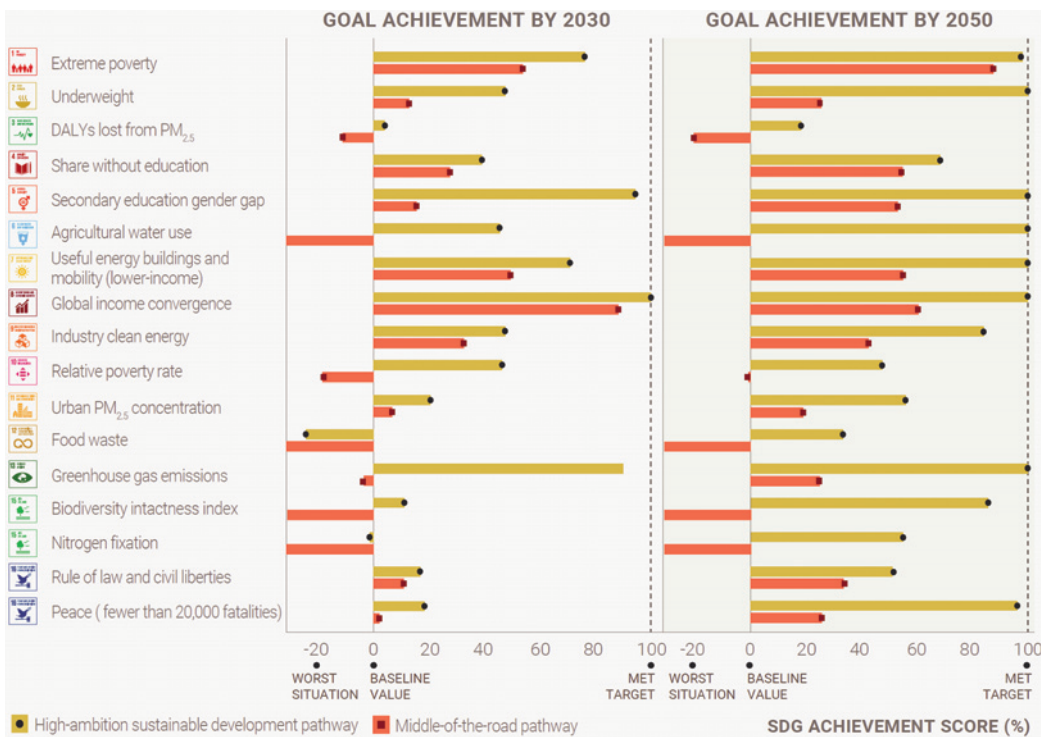


Fig. 11 | Projected global achievements to 2030 (left) and 2050 (right) for select sustainable development goals indicators. A value of zero represents the baseline value of the indicator in 2015, while 100% means the target is fully met; negative values represent a worsening of the situation. The main scenarios, middle-of-the-road (SSP2-NDC) and ambitious (SDP-1.5C), are shown as bars (source: Soergel et alii, 2021; IGS, 2023).

the environmental characteristics of products that meet equivalent functional requirements and consider the same system boundaries. Among the various independent EPD processing organisations, it is certainly worth mentioning the International EPD® System and the IBU-EPD, with the latter having a database solely of building materials (Sposito and Scalisi, 2019). If EPDs were used as early as the design phase, in addition to performance, technical and aesthetic characteristics, it would be possible to support the decision-making phase with environmental parameters such as Embodied Energy and Embodied Carbon, environmental impacts and possible impacts on human health, for example, through Health Product Declarations.

ERA-focused handbooks, guidance documents and databases have been produced to draw information for conducting the assessment, although to date they mainly refer to specific national regulations. Some of the most widely used include the Joint Research Centre's ExpoFacts⁹ database, sponsored by the European Commission, which contains data and information on both environment and public health for assessing risk from exposure to chemicals and on the population of all EU member states and of the Old Continent (31 countries in total) with numerous links and references – collected in an online database from more than 120 sources (databases, information systems of national institutes and international organisations, scientific articles, reports and surveys) – and the guidelines and tools (templates and databases) made available by EPA.¹⁰

The study conducted by Reina et alii (2014), as commissioned by the Joint Research Centre, selected eight worldwide exposure factor systems including, in addition to the two mentioned above, those of Canada, Australia, China, Japan, Korea

and Germany, is an important step toward harmonisation, interoperability and integration of the different ERA systems, analysing their commonalities and differences and identifying twenty criteria grouped into five categories (project management, design and architecture, data content, data quality and types of data values and usage).

Regarding ESA, it is worth noting that the variety of benefits that individual nature-based interventions can provide and the recognition of their importance have encouraged the production of numerous documents and tools for assessing ecosystem services. The choice of the instrument is linked to the purpose of the evaluation, to the required results (qualitative or quantitative, relative to a context, economic or not) and to operational issues such as skills, time, budget and data availability; each instrument, therefore, presents different strengths, limits and outputs. Within the wide range of instruments supporting ESA, the most widespread are Artificial Intelligence for Environment & Sustainability – ARIES¹¹, Co\$ting Nature¹², Ecosystem Services Toolkit – EST¹³, Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs – InVEST¹⁴, Land Utilisation and Capability Indicator – LUCI¹⁵, Multiscale Integrated Model of Ecosystem Services – MIMES¹⁶, Natural Capital Model¹⁷, NEAT Tree Short Tool Reviews¹⁸, Protected Area Benefits Assessment Tool – PA-BAT¹⁹, Social Values for Ecosystem Services – SoVES²⁰; Tool Assessor promoted by the Ecosystem Knowledge Network²¹, Toolkit for Ecosystem Service Site-Based Assessment – TESSA²², Urban Nature Navigator²³, ValUES Project Methods Database²⁴ and WaterWorld.²⁵

Some specific features of the available tools are illustrated by way of example: ARIES, MIMES, InVEST, Co\$tingNature, WaterWorld, and SoVES are digital modelling tools, with the first two capa-

ble of predicting scenarios and contextual and economic assessments of ecosystem services; InVEST is a suite with defined parameters for mapping and quantifying biophysical or economic ecosystem services under different scenarios, for which the user simply needs to find the input data; Co\$tingNature and WaterWorld provide the model parameters and all required input data so that the user only needs to specify an area of interest and choose from pre-selected scenarios or design their own; SoVES is an ArcGIS-dependent application that allows the user to identify, assess, and map the perceived social values that people attribute to Cultural Heritage and for the use of which the user is required to conduct stakeholder surveys and prepare models for context outputs.

Three tools (EST, TESSA, and PA-BAT) provide users with step-by-step guidance in the assessment of ecosystem services, supplying scoping exercises, worksheets to acquire information / directions for primary data collection (TESSA, EST), and a workshop with stakeholders (PA-BAT, TESSA). Four tools (EST, PA-BAT, SoVES, and TESSA) are designed to collect information on social and cultural ecosystem services through surveys or stakeholder workshops; ARIES, InVEST, MIMES, SoVES, Co\$ting Nature, and WaterWorld provide results for specific contexts; the first four, in addition to EST and TESSA, can also estimate economic values of ecosystem services; InVEST is the only tool that includes models developed for multiple marine and coastal ecosystem services, however, compared to the inventory, the most comprehensive appears to be ValUES with its 65 solutions that can be filtered by purpose, method and ecosystem service.

LCA, ERA and ESA: differences and similarities | The three assessments of life cycle, environmental risk and ecosystem services present several similarities and differences concerning survey methodology, inventory data, spatial and temporal resolution, cause-effect pathway, type of quantitative and/or qualitative approach and possibility of results aggregation (Fig. 6).

As previously reported, LCA is a quantitative methodology capable of returning the multiple effects caused by different stressors on a global scale and is highly efficient when considering human activity and technologies employed throughout the life cycle of a product or process. However, though it examines multiple impact factors, LCA does not investigate economic and ethical-social aspects and can only quantify potential and not actual impacts since CFs overlook temporal and spatial variability of stressors, also in ecosystem functioning, the implications of variation in species vulnerability, and differences in effects in near and far contexts relative to different assessment boundaries. These limits introduce the 'uncertainty' factor into the inventory, as also emphasised by ISO 14040:2006 and 14044:2006.²⁶

In contrast, ERA assesses the exposure of ecological systems to specific stressors in a specific environmental scenario in relation to the chosen spatial and temporal resolutions, mainly taking into consideration the realistic worst possible case according to the precautionary principle. As a receptor-based methodology aimed at local impacts, ERA is limited in assessing global impacts and cumulative impacts due to multiple stressors

since, for the latter, it relies mainly on semi-quantitative methods to link the stressor with the human or ecological receptor. ESA relies on qualitative and quantitative methods to return the changes of both an ecosystem in space and time and the supply and demand for ecosystem services that depend on local, regional and national social, cultural and economic systems.

In ERA, impacts caused by multiple stressors on one or more receptors can be determined using aggregate or cumulative exposure assessments (EPA, 2003), making it possible to appreciate the relative contribution of stressors, exposure pathways, and sources in the overall impact, to develop the best risk management strategies; however, these assessments are quite complex (Stelzenmüller et alii, 2018) and the cumulative effect of multiple stressors cannot always be presumed to be merely additive (Holsman et alii, 2017).

Aggregation of results, which is useful for comparing alternative strategies / solutions and facilitating communication of results, is also a critical factor for ESA and LCA. In ESA, aggregation through economic parameters is criticised by the scientific world for ethical reasons (Sullivan and Hannis, 2017), while aggregation of services into a single value is difficult because of the variability of the benefits of individual services at different scales (Small, Munda and Durance, 2017). In LCA, the critical issue lies in the fact that the results are the product of a weighting phase in which weights are assigned to the various impact categories, according to their relative importance and thus to the priorities of the assessment: as a consequence, the final result is a 'weighted' figure based on a subjective scale of values. In this respect, ISO regulations do not provide examples of weighting methods, while ISO 14044:2006 suggests that weighting should not be used in studies intended for public disclosure and for comparative purposes.

For better understanding, transparency, reproducibility, robustness and reliability of the results, especially in the interpretation stage, it is necessary to conduct an 'uncertainty assessment of the results' themselves. According to EPA (2011), uncertainties relate to the data, scenario, and model; specifically, they may originate in the data employed in the inventory analysis to represent the elementary flows in the system's processes, in the characterisation factor that is used in the assessment of impacts for the transformation of the inventory into an environmental impact score, in the assumptions that are made during the system's construction (e.g., the representativeness of the processes that are used in the model), and/or in the choices of allocation criteria and assessment method. ISO 14044:2006 addresses this critical issue by highlighting the need to conduct a 'sensitivity analysis' to identify the most important sources of uncertainty and to check how data, scenario, and model affect the final result; although ISO does not recommend a specific methodology and much research has been conducted on the topic over the past decades, even today most studies neglect the uncertainty analysis and sensitivity study while others only examine uncertainty only in the inventory data (Lloyd and Ries, 2007; Groen et alii, 2017; Igos et alii, 2019). As a methodology geared toward identifying benefits, the ESA cause-effect

chain correlates the transformation of ecosystem components with changes in the supply of and demand for ecosystem services and generated benefits, which LCA and ERA cannot independently assess, as they are primarily impact-oriented methodologies. Conversely, because ESA is an ecosystem-based approach whose changes are not necessarily the result of human activity, this methodology alone cannot quantify anthropogenic impacts on ecosystem services and their benefits to human well-being at different scales without relying on impact assessment methodologies such as LCA and ERA. In general, while LCA and ERA cause-effect pathways focus primarily on assessing the negative effects of anthropogenic activities on ecosystems – although LCA has seen studies for the inclusion of the 'handprint concept' to account for the potential positive impacts of humans on the environment (Alvarenga et alii, 2020) – ESA is more benefit-oriented. Furthermore, concerning the nature of cause-effect pathways, it is worth noting that ERA and ESA pathways have been criticised because they assume a linear nature, while causality in social-ecological systems is dynamic (Preiser et alii, 2018).

LCA and ERA also differ in the concept of 'endpoints': for the former, endpoints are a group of indicators that express the damage-level impact of a product / service (end of the cause-effect chain), while for the latter they are receptors to be protected; finally, a common element between LCA ERA and ESA is the iterative nature of the methodology employed.

The integration of LCA, ERA and ESA: state of the art

Each of the three presented methodologies, with its strengths and weaknesses, thereby allows for the assessment of the negative impacts of anthropogenic action and/or the benefits of ecosystem services for humans at a different spatial and temporal resolution. However, as of today, there is no single methodology that can comprehensively assess the overall ecological footprint, especially concerning the multifunctional use of terrestrial and aquatic ecosystems, although studies have already been conducted to evaluate the integration of LCA, ERA and ESA methodologies with the aim of overcoming individual critical issues and boosting specific strengths (De Luca Peña et alii, 2022).

The Scopus database was used to analyse the state of the art regarding the integration of the three methodologies, employing keywords, selection criteria and reporting period as indicated in 'Methodology and limitations of the study'. The selection resulted in the identification of a total of 62 studies, of which 15 related to the integration of LCA and ERA (Tab. 2), 23 of LCA and ESA (Tab. 3) and 24 of ERA and ESA (Tab. 4); it was not possible to identify a single case study that integrated all three methodologies.

The analysis of the aforementioned studies shows that the integration of LCA and ERA has mainly been developed by aggregating the latter into the former through the formulation of new spatially differentiated CFs, new impact pathways or by modifying LCA impact categories. Some studies conducted the two assessments independently, while others then combined the results on a qualitative and/or quantitative level; some studies employed multi-criteria analysis to quan-

titatively combine LCA and ERA results performed individually on the same case study, while still others normalised LCA results and compared them with ERA results; only the study by Ayoub et alii (2015) used LCA results to identify processes with high environmental impact in a product's life cycle and then to conduct an environmental risk assessment based on those specific processes.

Some of the most frequently found challenges, sometimes noted by the authors themselves, include: a) the lack of certain input data; b) the difficulty in integrating the two methodologies due to their differences in model structure, approaches, scopes and different spatial and temporal resolutions; c) the selection of appropriate exposure pathways to reduce bias in the assessment especially when assessing multiple stressors simultaneously; and d) the failure to consider the entire life cycle in the assessment. Finally, Muazu, Rothman and Maltby (2021) identified other critical issues, including the risk of double counting, possible inconsistencies in parameter selection and modelling, and the lack of standardised guidelines and procedures to integrate the two survey methodologies.

Integration between LCA and ESA has also been predominantly developed by aggregating the latter with the former, often considering ecosystem services as an additional impact pathway to traditional LCA pathways and providing spatially differentiated midpoint and endpoint CFs, as suggested by the UN Environment Programme and Society of Environmental Toxicology and Chemistry guidelines. While on a conceptual level, several contributions reviewed by Koellner et alii (2013) have suggested rethinking the LCA's AoPs to include ecosystem services, some of the analysed case studies extended LCA boundaries with supply and demand of ecosystem services, others proposed the integration of the cascade model into LCA, and still others employed LCI flows by integrating inputs from bioeconomic models of ecosystem services or used LCA results to quantify the value of an ecosystem service.

This integration between the two assessment methodologies also presents several critical issues, primarily the difficulty of harmonising different spatial and temporal resolutions of ecosystem services in LCA. Other limitations can be identified in the inability to integrate some elements of the ESA into available LCA software, the accounting of ecosystem services at different scales, the risk of overlapping and double counting when ecosystem services are assessed as impact categories, data availability, and the lack of guidelines and normed procedure for integrating the two survey methodologies.

Among studies involving ERAs and ESAs, prevalent are those in which ERA endpoints have been integrated with ecosystem services whose potential, strengths and criticalities are reported: through EPF methodology, a biophysical structure or service-providing units were linked with the supply of ecosystem services which, in several cases, were used to define ERA boundaries and scenarios. Some studies utilised the InVEST tool with semi-quantitative approaches to obtain scores on the risk and supply of ecosystem services through the Habitat Risk Assessment (HRA) module; in some cases, risk scores obtained through HRA were aggregated with ecosystem service

supply scores to calculate the vulnerability index of a specific ecosystem. Other studies combined different approaches to calculate cumulative risk on ecosystems and thus risk on related service provision, while still others identified economic values of ecosystem services to parameterise risk scores or, in contrast, determined the value, economic and otherwise, of ecosystem services through risk scores.

The main limitations noted in this group of studies are similar to those that emerged in the integration between LCA and ESA, and among them is the difficulty in identifying the interconnections, dynamics and relationships among ecosystem services and in linking multiple stressors to a single ecosystem service. Other critical issues include: a) the selection of ERA endpoints that are not representative of a particular ecosystem service; b) the monetisation of ecosystem services; c) the failure to assign different weights to different ecosystem services; d) the variability of temporal and spatial resolutions when trying to account for the effect of stressors on the ecosystem service provision unit; e) the use of a weighted method for the relevance of risks or systemic services; f) the

presence of conflicts of interest among stakeholders in determining the most relevant ecosystem services; g) the availability of data; and h) the lack of guidelines and regulated procedure for integrating the two survey methodologies.

In general, the different contributions analysed show a variety of approaches that De Luca Peña et alii (2022) classified in relation to the points in the cause-effect chain at which integration occurs: the first type of integration occurs at the 'post-analysis' stage, therefore the two methodologies are conducted independently of each other and the results of both are the subject of a 'combined qualitative interpretation'; the second type occurs through the 'combination of results', developing the two methodologies independently of each other and combining / aggregating the results in a further quantitative or qualitative stage at the end of the cause-effect chain; the third type involves the integration of results through the 'complementation of a driving method', and in this case, a first methodology guides the evaluation and incorporates some relationships from the cause-effect chain of the second into its own, either at selected points or along the entire chain.

For the purpose of a future study aimed at integrating the three assessment methods, a point to be made is that each of the approaches combining assessments was not exempt from difficulties: though such approaches make it possible to capture global and local effects without the need for statistical correlation of results, all three bear the risk of double-counting of impacts, and sometimes 'post-analysis' and 'combining results' lead to different results that can be difficult to understand or even mislead decision makers; furthermore, both the 'combination of results' and the integration of results through the 'complementation of a driving method' require rather long analysis times, and while the latter generates a real integration of analysis methodologies, it also requires a lot of data, the absence of which affects the uncertainty of the results.

Reflections for a holistic and systemic integration of decision-making tools | Despite their inherent criticalities, the three methodologies constitute valuable decision-making tools for project support, as they can guide the designer in solving problems that are too complex for humans and

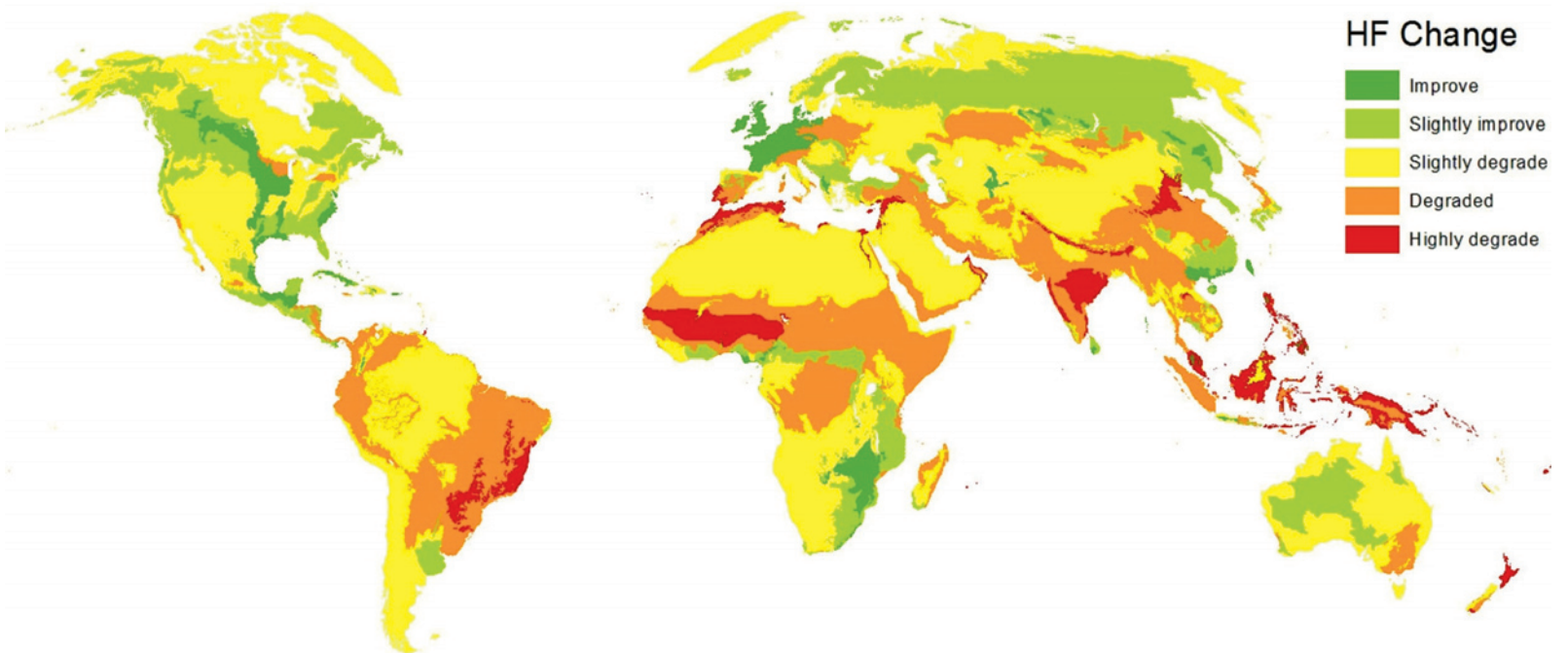


Fig. 12 | Human's impact on the environment increased or decreased from 1993 to 2009 (credit: O. Venter; source: nationalgeographic.com).

Fig. 13 | Possible scenarios as a result of climate change: aridification and rising sea levels (source: georgetown.edu).

too qualitative for traditional computer processing. However, LCA, ERA, and ESA cannot address the complexity of the ‘multi-hazard’ condition faced by planet Earth, both individually and in combination (Fig. 7, 8). This challenge can only be met with a holistic and systemic approach to design that is capable of providing both ecosystem benefits / services and solutions to address the various environmental risks and numerous ecosystem vulnerabilities, mutating an anthropocentric view into one ‘in symbiosis’ with nature.

Academics and philosophers have promoted various economic theories from the perspective of sustainable development and safeguarding future generations, from the Happiness Economics (Kahneman, 2007) to the Sharing Economy (Botsman and Rogers, 2010), from Qualitative Growth (Capra and Henderson, 2013) and Serene Degrowth (Latouche, 2015; Raworth, 2017), from the Blue Economy (Pauli, 2009) to the Circular Economy (Ellen MacArthur Foundation, 2010), but also design approaches focused on Biomimicry (Benyus, 1997) and Cradle to Cradle and upcycle (McDonough and Braungart, 2002, 2013), the ‘8 Rs’ (Revalue, Reconceptualize, Restructure, Re-

distribute, Relocate, Reduce, Reuse, Recycle) and the six ReSOLVE action areas (REgenerate, Share, Optimise, Loop, Virtualise, Exchange; Ellen MacArthur Foundation 2015), on the Open Building Habraken (1972) and Shearing Layers of Change Brand (1994), on Design for Disassembly and Reversible Building Design (Durmisevic, 2006, 2018), on mitigative and adaptive resilience of the built environment (Tucci and Sposito, 2020) just to name a few.

One must wonder, then, why the desired digital, energy and ecological transitions are still so far from implementation, especially considering the presence of goals shared by the United Nations, individual countries and various International Organizations, as well as Strategic Programs with exceptional financial provisions and advanced digital tools.

If a first cause is identifiable in the period of uncertainty we are experiencing related to the multiple and interconnected crises that have characterised the last fifteen years, a closer reflection and analysis of the published research on the issue of sustainability in the building sector reveals that the actions put in place have been mainly

aimed at addressing individual objectives and solving specific aspects regarding the circularity of materials rather than the disassemblability of components or even the containment of energy consumption or adaptive materials and elements or the use of nature-based solutions, etc. as if each of these aspects individually were capable of limiting and/or even zeroing the impacts of anthropogenic action in the biosphere and solving the current state of environmental emergency and/or polycrisis.

This ‘short-sighted’ view is also confirmed by the very recent Global Sustainable Development Report (IGS, 2023), which on the one hand reports how far we are from achieving the individual SDGs and their progress with projections to 2030 and 2050, based on data accessible as of May 2023, and on the other shows the limited interconnections between the 17 SDGs and the 136 pairs of Goals (Fig. 9-11), ultimately concluding that the early Millennium crises can become an opportunity to be overcome with broad and inclusive strategies that consider multiple interconnected goals and combine local action with international cooperation, offering room for action that

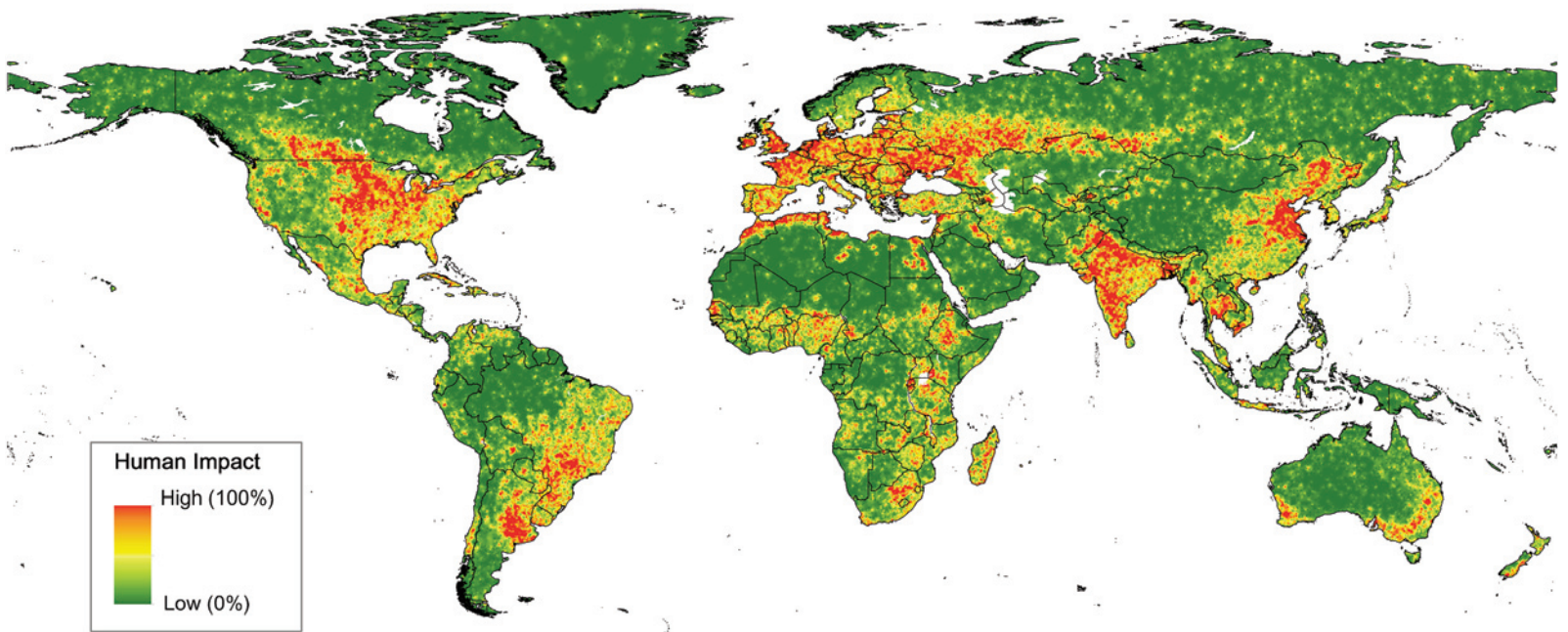
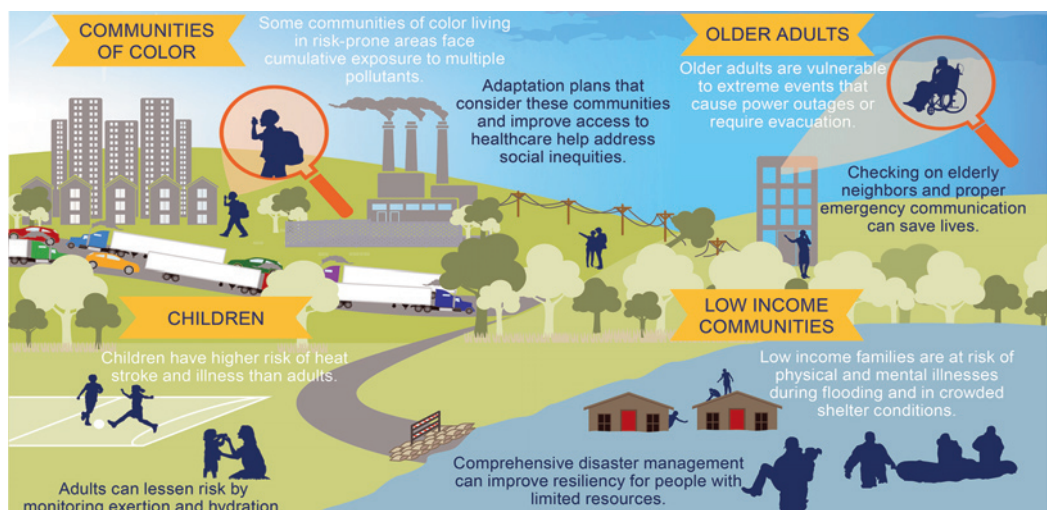


Fig. 14 | Human impact and wilderness characterisation, created using Geo-Wiki in 2012 (source: iiasa.ac.at).

Fig. 15 | Examples include populations at the highest risk of exposure to adverse climate-related health threats and adaptation measures that can help address disproportionate impacts (source: noaa.gov).



previously would have seemed overly ambitious or extreme; the same report culminates with a call for greater investment in research and development but also in scientific tools for predictive assessment, quality data, and economic and non-economic metrics capable of 'restoring' the value of human life and nature and monitoring progress in improving human well-being, environmental and biodiversity protection, as well as public service provision.

With this in mind, this paper, recalling Goal 17 – 'Strengthen the means of implementation and revitalise the global partnership for sustainable development' and building on the hope of the aforementioned Global Sustainable Development Report 2023, argues for the need to activate urgent research actions for the integration of LCA methods, ERA and ESA to provide the various stakeholders with a decision-making tool to assess, on a broad scale, not only how humans affect ecosystems and the services they provide, but also how natural systems affect humans, examining the full range of interactions between anthropogenic-productive systems and terrestrial and marine natural systems, since this is the only way to understand, measure and quantify impacts and benefits at multiple scales.

Current developments in this area of research are rather uncertain and simultaneously define current limitations, as research on the integration of LCA, ESA and ERA is sectoral and often based on intuition rather than science-based, instrumental, verifiable, comparable and replicable models. To overcome this challenge, it is desirable that the United Nations on a par with government agencies (UN Environment Programme and Society of Environmental Toxicology and Chemistry, World Health Organization, European Environment Agency, Environmental Protection Agency, Joint Research Centre, ENEA, etc.) and forward-looking International Organizations active in research for the preservation of our planet launch a call to create an international technical table comprising of the best experts of the three methodologies LCA,

ERA and ESA, to assess whether the prerequisites exist – without prejudice to the current independence of the individual methodologies – for their 'post-analysis' integration, through 'combination of results' or the 'complementation of a driving method', or whether it is necessary to consider a new methodology that, by integrating the objectives, aims and outputs of the three assessments, is able to return the complexity of the aforementioned multi-hazard condition for humans and the environment by overcoming the challenges and limitations exposed in this essay.

Specifically, the technical table of experts should be tasked with: 1) developing an assessment methodology; 2) defining metrics, statistical descriptors, criteria and shared protocols for data collection, processing and analysis; 3) identifying relevant characterization factors (environmental, social and economic) and exposure factors, as well as areas of protection; 4) assessing the methods of conducting 'sensitivity analyses' to identify the most important sources of uncertainty; 5) implementing an open-access computer database to facilitate indexing and retrieval of information on exposure factors globally, with the involvement of companies willing to provide data representative of specific production processes and technologies for their geographic areas; 6) developing a user-friendly and implementable IT tool for the assessment of impacts and benefits, with special reference also to economic and ethical-social aspects, capable of harnessing the potential of artificial intelligence to process and prefigure alternative scenarios; 7) providing guidance for the selection and use of data in relation to specific exposure scenarios and population of interest and for the use of the digital assessment tool; 8) promoting the new digital tool and assessing its possibility for mandatory regulation after a period of experimentation and verification through the use of scientific method.

If the New European Bauhaus has shown the way to radically reshape traditional 'sectoral' and 'single-objective' approaches to design, acting as

a bridge between science, technology and art and a vector to drive epochal changes, we now certainly need a sustainability assessment tool that, from a holistic and systemic perspective, is able on the one hand to resolve the complexity of individual analysis methodologies (LCA, ERA and ESA), and on the other hand has the potential to address the complexity of the climate-environmental condition in which we find ourselves, configuring action scenarios capable of counteracting the polycrisis, reducing multiple ecosystem vulnerabilities (Fig. 12-15), providing ecosystem services for human well-being, and safeguarding biodiversity, while simultaneously meeting as many of the Sustainable Development Goals as possible by 2030.

Acknowledgements

The contribution, resulting from a common reflection, is to be assigned in equal parts to both Authors.

Notes

1) Calculation methods include CML 2001, ReCiPe, TRACI, Eco-Indicator 99, EPS 2000, EDIP 2003, IMPACT 2002+, BEES, IPCC 2007 GWP, etc. The structure also follows the ISO 14042 standard for classification, characterisation, normalisation and weighting phases.

2) Other ISO standards in the 14040 series supplement the general guidelines (e.g., ISO 14046:2014 for water footprint); other environmental management standards are linked to ISO 14040-44, such as ISO 14006:2020 (eco-design), ISO 14025:2006 (environmental labelling), ISO 14064-1:2008 (carbon footprint of organisations), ISO 14067:2018 (carbon footprint of products), ISO 14072:2014 (organisational LCA).

3) Concerning climate change, the affected flows are translated into their climate-changing potential using CO₂ equivalent as the unit of measurement; for example, methane, which has 25 times the climate-changing power of CO₂, has

a characterisation factor of 25 kg of CO₂ equivalent while for particulate matter all relevant outputs are converted to PM_{2.5} equivalent.

4) Similar to ERA is the Environmental Impact Assessment (EIA), which assesses the potential environmental impacts of specific projects such as infrastructure, mining or industrial facilities on air, water, soil, biodiversity, cultural heritage and human health, as well as social and economic impacts such as employment, community development and economic growth. The EIA aims to ensure that human activity is compatible with the conditions for sustainable development and, thus, in accordance with the regenerative capacity of ecosystems and resources, the preservation of biodiversity, and the equitable distribution of benefits associated with economic activity. The EIA procedure is structured on the principle of preventive action, according to which the best environmental policy is to prevent negative effects related to project implementation rather than to combat the effects later. In Europe, the EIA was introduced by EU Directive 85/337/EEC, which, together with the Single European Act of 1986 and the Maastricht Treaty of 1992, concurrently forms the pillars of European environmental policy principles. The EIA was implemented in Italy with Law no. 349 of 8 July 1986 and subsequent modi-

fications. The procedure's structure saw various updates over the years: with the VIA Directive 2014/52/EU, implemented in Italy with Legislative Decree n. 104 of 16 May 2017, the rectified issues concern the simplification and harmonisation of EIA procedures with other environmental authorisations, the strengthening of the quality of the procedure, and the revision of the penalty system in case of non-compliance.

5) For more information, see the webpage: eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/index.xhtml [Accessed 16 October 2023].

6) For more information, see the webpage: arcadia.enea.it/il-progetto.html [Accessed 16 October 2023].

7) For more information, see the webpage: lifemagis.eu [Accessed 16 October 2023].

8) The Product Category Framework Rules define the indicators to be reported, the information to be provided, and the methods by which they are collected and reported; they describe which life cycle stages are considered in the EPD and which processes are to be included; they define the rules for developing assessment scenarios; they include rules for inventory calculation and impact validation in the life cycle analysis underlying the EPD, including specifications to be applied to product, process and service life cycle assessment; they define the conditions for which construc-

tion products can be compared based on the information in the EPD.

9) For more information, see the webpage: data.jrc.ec.europa.eu/dataset/jrc-10114-10001#publications [Accessed 16 October 2023].

10) For more information, see the webpage: 19january2017snapshot.epa.gov/risk/risk-tools-and-databases_.html [Accessed 16 October 2023].

11) For more information, see the webpage: aries.integratedmodelling.org [Accessed 16 October 2023].

12) For more information, see the webpage: policysupport.org/costingnature [Accessed 16 October 2023].

13) For more information, see: Value of Nature to Canadians Study Taskforce (2017).

14) For more information, see the webpage: naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest [Accessed 16 October 2023].

15) For more information, see the webpage: lucitools.org [Accessed 16 October 2023].

16) For more information, see the webpage: ipbes.net/policy-support/tools-instruments/multi-scale-integrated-models-ecosystem-services-mimes#:~:text=MIMES%20is%20an%20ecosystem%2Dbased,levels%20under%20different%20future%20scenarios [Accessed 16 October 2023].

17) For more information, see: Remme, de Nijs and Paulin (2018).

18) For more information, see the webpage: neat.ecosystemsknowledge.net/short-tool-reviews.html [Accessed 16 October 2023].

19) For more information, see: Dudley and Stolton (2009).

20) For more information, see the webpage: code.usgs.gov/solves/solves-4.0 [Accessed 16 October 2023].

21) For more information, see the webpage: ecosystemsknowledge.net/tool-search [Accessed 16 October 2023].

22) For more information, see the webpage: tessa.tools [Accessed 16 October 2023].

23) For more information, see the webpage: naturvation-navigator.com [Accessed 16 October 2023].

24) For more information, see the webpage: aboutvalues.net/about_values/ [Accessed 16 October 2023].

25) For more information, see the webpage: policysupport.org/waterworld [Accessed 16 October 2023].

26) According to ISO 14040:2006, «The lack of spatial and temporal dimensions in the LCI results introduces uncertainty in the LCIA results. The uncertainty varies with the spatial and temporal characteristics of each impact category». According to ISO 14044:2006, «Depending on the environmental mechanism and the goal and scope, spatial and temporal differentiation of the characterisation model [...] should be considered».

References

Alvarenga, R. A. F., Huysveld, S., Taelman, S. E., Sfez, S., Pr at, N., Cooreman-Algoed, M., Sanjuan-Delm as, D. and Dewulf, J. (2020), “A framework for using the handprint concept in attributional life cycle (sustainability) assessment”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 265, article 121743, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121743 [Accessed 16 October 2023].

Andaloro, B., de Waal, M. and Suurenbroek, F. (2022), “Lo spazio pubblico adattivo – Esplorare la transizione digitale per il benessere sociale e ambientale | Adaptive public spaces – Exploring digital transition for social and environmental benefit”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 68-75. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1262022 [Accessed 16 October 2023].

Anderson, C. C., Denich, M., Warchold, A., Kropp, J. P. and Pradhan, P. (2022), “A systems model of SDG target influence of the Goals on the 2030 Agenda for Sustainable Development”, in *Sustainability Sciences*, vol. 17, pp. 1459-1472. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11625-021-01040-8 [Accessed 16 October 2023].

Apreda, C., D’Ambrosio, V. and Di Martino, F. (2019), “A climate vulnerability and impact assessment model for complex urban systems”, in *Environmental Science & Pol-*

icy, vol. 93, pp. 11-26. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.016 [Accessed 16 October 2023].

Arskey, H. and O’Malley, L. (2005), “Scoping studies – Towards a methodological framework”, in *International Journal of Social Research Methodology*, vol. 8, issue 1, pp. 19-32. [Online] Available at: doi.org/10.1080/1364557032000119616 [Accessed 16 October 2023].

ASviS – Alleanza Italiana per lo Sviluppo Sostenibile (2020), *Politiche per fronteggiare la crisi da Covid-19 e realizzare l’Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile*. [Online] Available at: asvis.it/public/asvis2/files/Pubblicazioni/RapportoASviSCovidAgenda2030.pdf [Accessed 16 October 2023].

Aven, T. (2016), “Risk assessment and risk management – Review of recent advances on their foundation”, in *European Journal of Operational Research*, vol. 253, issue 1, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023 [Accessed 16 October 2023].

Ayoub, N., Musharavati, F., Pokharel, S. and Gabbar, H. A. (2015), “Risk based life cycle assessment conceptual framework for energy supply systems in large buildings”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 107, pp. 291-309. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.075 [Accessed 16 October 2023].

Baiani, S. and Altamura, P. (2019), “Il Processo del Progetto per la Resource Productivity – Un caso studio | The Design Process towards Resource Productivity – A case study”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 83-92. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/592019 [Accessed 16 October 2023].

Baral, H., Guariguata, M. R. and Keenan, R. J. (2016), “A proposed framework for assessing ecosystem goods and services from planted forests”, in *Ecosystem Services*, vol. 22, part B, pp. 260-268. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.10.002 [Accessed 16 October 2023].

Baratta, A. F. L., Andreotti, J., Trulli, L. and Calcagnini, L. (2023), “L’innovazione di prodotto per la transizione ecologica – Il riciclo del laterizio e del vetro | Product innovation for the ecological transition – Brick and glass recycling”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 227-236. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13192023 [Accessed 16 October 2023].

Bason, C., Conway, R., Hill, D. and Mazzucato, M. (2020), *A New Bauhaus for a Green Deal*, November. [Online] Available at: ucl.ac.uk/bartlett/public-purpose/sites/public-purpose/files/new_bauhaus_cb_rc_dh_mm_0.pdf [Accessed 16 October 2023].

Basso, S., Bisiani, T., Martorana, P. and Venudo, A. (2023), “Vertical farm – Dalle forme dell’agricoltura nuove architetture e città | Vertical farm – New architectures and cities from the forms of agriculture”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 141-152. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13122023 [Accessed 16 October 2023].

Beever, E. A., O’Leary, J., Mengelt, C., West, J. M., Julius, S., Green, N., Magness, D., Petes, L., Stein, B., Nicotra, A. B., Hellmann, J. J., Robertson, A. L., Staudinger, M. D., Rosenberg, A. A., Babij, E., Brennan, J., Schuurman, G. W. and Hofmann, G. E. (2016), “Improving conservation outcomes with a new paradigm for understanding species’ fundamental and realized adaptive capacity”, in *Conservation Letters*, vol. 9, pp. 131-137. [Online] Available at: doi.org/10.1111/conl.12190 [Accessed 16 October 2023].

Benyus, J. M. (1997), *Biomimicry – Innovation Inspired by Nature*, Harpercollins, New York.

Beyers, B. and Wackernagel, M. (2019), *Ecological Footprint, managing our biocapacity budget – Global Footprint Network*, New Society Publishers, Gabriola Island (Canada).

Bjorn, M. O., Molin, C. and Laurent, A. (2017), “Main characteristics of LCA”, in Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K. and Olsen, S. I. (eds), *Life Cycle Assessment | Theory and Practice*, Springer, Cham, pp. 9-16. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3 [Accessed 16 October 2023].

Bologna, R. and Hasanaj, G. (2023), “Modelli evoluti per la costruzione di un catalogo NbS per la resilienza e la biodiversità | Advanced models for the construction of an NbS catalogue for resilience and biodiversity”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 179-190. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13152023 [Accessed 16 October 2023].

Botsman, R. and Rogers, R. (2010), *What’s mine is yours*, Harper Business, London.

Brand, S. (1994), *How Buildings Learn – What Happens After They’re Built*, Viking, New York.

Broström, T., Donarelli, A. and Berg, F. (2017), “Per classificare il patrimonio storico e determinare il risparmio energetico | For the categorisation of historic buildings to determine energy saving”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 1, pp. 135-142. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1212017 [Accessed 16 October 2023].

Buckwell, A., Fleming, C., Smart, J., Mackey, B., Ware, D., Hallgren, W., Sahin, O. and Nalau, J. (2018), “Valuing aggregated ecosystem services at a national and regional scale for Vanuatu using a remotely operable, rapid assessment methodology”, in *AARES Conference – 2018 Conference (62nd), February 7-9, 2018, Adelaide (Australia)*, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.22004/ag.econ.273524 [Accessed 16 October 2023].

Burkhard, B., Santos-Martin, F., Nedkov, S. and Maes, J. (2018), “An operational framework for integrated Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services (MAES)”, in *One Ecosystem*, vol. 3, e22831, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.3897/oneeco.3.e22831 [Accessed 16 October 2023].

Butera, F. M. (2023), *Affrontare la Complessità – Per governare la transizione ecologica*, Edizioni Ambiente, Milano.

B scher, L., Polster, R. and Klussmann, H. (2022), “Botanical concrete – Sperimentazione su substrati di calcestruzzo per l’inverdimento verticale | Botanical concrete – Experimentation on concrete substrates for vertical greening”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 11, pp. 266-273. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11242022 [Accessed 16 October 2023].

Campioli, A., Dalla Valle, A., Ganassali, S. and Giorgi, S. (2018), “Progettare il ciclo di vita della materia – Nuove tendenze in prospettiva ambientale | Designing the life cycle of materials – New trends in environmental perspective”, in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 16, pp. 86-95. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-23016 [Accessed 16 October 2023].

Capra, F. and Henderson, H. (2013), *Crescita qualitativa – Per un’economia ecologicamente sostenibile e socialmente equa*, Aboca Edizioni, Arezzo.

Carpenter, S. R., Bennett, E. M. and Peterson, G. D. (2006), “Scenarios for ecosystem services – An overview”, in *Ecology & Society*, vol. 11, issue 1, article 29. [Online] Available at: ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art29/ [Accessed 16 October 2023].

Carson, R. (1962), *Silent Spring*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston.

Chaves Coelho Leite, B., Gobatti, L. and Gamba Huttenlocher, I. (2022), “Tetti verdi subtropicali a bassa manutenzione – Verde spontaneo e profondità del substrato | Low-maintenance subtropical green roofs – Spontaneous vegetation and substrate depth”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 11, pp. 258-265. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11232022 [Accessed 16 October 2023].

Circle Economy (2021), *The Circularity Gap Report 2021*. [Online] Available at: circle-economy.com/resources/circularity-gap-report-2021 [Accessed 16 October 2023].

Clemente, C., Palme, M., Mangiardi, A., La Rosa, D. and Privitera, R. (2022), “Il verde urbano nella riduzione dei carichi di raffrescamento – Simulazioni nel clima Mediterraneo | Urban green areas in the reduction of cooling loads – Simulations in the Mediterranean climate”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol.

- 11, pp. 182-191. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11162022 [Accessed 16 October 2023].
- Cocci Grifoni, R., Brownlee, T. D., Marchesani, G. E. and Ottone, M. F. (2022), "La micro-forestazione urbana per l'adattamento climatico nei porti minori del medio Adriatico | Urban micro-forestry for climate adaptation in the smaller ports of the mid-Adriatic sea", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 11, pp. 172-181. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11152022 [Accessed 16 October 2023].
- Costanza, R., de Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., Farber, S. and Grasso, M. (2017), "Twenty years of ecosystem services – How far have we come and how far do we still need to go?", in *Ecosystem Services*, vol. 28, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008 [Accessed 16 October 2023].
- Crippa, D., Cason Villa, M., Di Prete, B., Ratti, L., Rebaglio, A., Zanini, M. and Zanotto, F. (2022), "Verso un progetto circolare, tra architettura e allestimento – Piattaforme digitali per il riuso | Towards a circular project, between architecture and exhibition design – Digital platforms for reuse practices", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 234-245. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12212022 [Accessed 16 October 2023].
- Crowther, T. W., Boddy, L. and Jones, T. H. (2011), "Outcomes of fungal interactions are determined by soil invertebrate grazers", in *Ecology Letters*, vol. 14, pp. 1134-1142. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01682.x [Accessed 16 October 2023].
- Crutzen, P. J. and Stoermer, E. F. (2000), "The Anthropocene", in *IGBP Newsletter*, n. 41, pp. 17-18. [Online] Available at: igbp.net/download/18.316f18321323470177580001401/1376383088452/NL41.pdf [Accessed 16 October 2023].
- D'Ambrosio, V., Di Martino, F. and Rigillo, M. (2022), "Tecnologie geocomputazionali digitali per il metaprogetto di infrastrutture verdi urbane | Digital geocomputational technologies for the metaproject of urban green infrastructures", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 11, pp. 162-171. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11142022 [Accessed 16 October 2023].
- de Groot, R., Moolenaar, S., van Weelden, M., Konovska, I. and de Vente, J. (2018), *The ESP guidelines in a nutshell (to analyse and capture the benefits of landscape restoration, nature conservation, and sustainable land management)*. [Online] Available at: es-partnership.org/wp-content/uploads/2018/10/The-ESP-Guidelines-in-a-Nutshell-Sept-2018.pdf [Accessed 16 October 2023].
- De Joanna, P., Bronzino, E. and Lusi, V. (2022), "Resilienza e circolarità nel progetto edilizio sostenibile – Strumenti di valutazione integrata preliminare | Resilience and circularity in sustainable building design – Integrated tools for pre-intervention assessment", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 122-135. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12112022 [Accessed 16 October 2023].
- De Luca Peña, L. V., Taelman, S. E., Prétat, N., Boone, L., Van der Biest, K., Custodio, M., Hernandez Lucas, S., Everaert, G. and Dewulf, J. (2022), "Towards a comprehensive sustainability methodology to assess anthropogenic impacts on ecosystems – Review of the integration of Life Cycle Assessment, Environmental Risk Assessment and Ecosystem Services Assessment", in *Science of The Total Environment*, vol. 808, article 152125, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152125 [Accessed 16 October 2023].
- Desmaison, B., Buondonno, L., Viola, G. and Giachetta, A. (2019), "Abitare l'emergenza – Progetto per un insediamento adattivo a Bélen, Iquitos | Living with emergency – Design for an adaptive settlement in Belén, Iquitos", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 6, pp. 138-147. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/6132019 [Accessed 16 October 2023].
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E., Ngo, H. T., Guèze, M., Agard Trinidad, J., Arneith, A., Balvanera, P., Brauman, K., Butchart, S., Chan, K., Garibaldi, L., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G., Miloslavich, P., Molnar, Z., Obura, D., Pfaff, A., Polasky, S., Purvis, A., Razaque, J., Reyers, B., Chowdhury, R. R., Shin, Y.-J., Vlsersen-Hamakers, I., Willis, K. and Zayas, C. (2019), *Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn.
- Dodd, N., Cordella, M., Traverso, M. and Donatello, S. (2017), *Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings – Parts 1 and 2 – Introduction to Level(s) and how it works (Beta v1.0)*, EUR 28899 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC109285. [Online] Available at: doi.org/10.2760/827838 [Accessed 16 October 2023].
- Dudley N. and Stolton, S. (2009), *The Protected Areas Benefits Assessment Tool – A Methodology*. [Online] Available at: awssasets.panda.org/downloads/pa_bat_final_english.pdf [Accessed 16 October 2023].
- Dunford, R., Harrison, P., Smith, A., Dick, J., Barton, D. N., Martin-Lopez, B., Kelemen, E., Jacobs, S., Saarikoski, H., Turkelboom, F., Verheyden, W., Hauck, J., Antunes, P., Aszalós, R., Badae, O., Baró, F., Berry, P., Carvalho, L., Conte, G., Blanco, G. G., Howard, D., Giuca, R., Gomez-Baggethun, E., Grizzetti, B., Izakovicova, Z., Kopperoinen, L., Langemeyer, J., Luque, S., Lapola, D. M., Martinez-Pastur, G., Mukhopadhyay, R., Roy, S. B., Niemelä, J., Norton, L., Ochieng, J., Odeh, D., Palomo, I., Pinho, P., Priess, J., Rusch, G., Saarela, S.-R., Santos, R., van der Wal, J. T., Vadineanu, A., Vári, Á., Woods, H. and Yli-Pelkonen, V. (2018), "Integrating methods for ecosystem service assessment – Experiences from real world situations", in *Ecosystem Services*, vol. 29, pp. 499-514. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.10.014 [Accessed 16 October 2023].
- Durmisevic, E. (2019), *Circular economy in construction design strategies for reversible buildings*, BAMB, Netherlands. [Online] Available at: bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/05/Reversible-Building-Design-Strategies.pdf [Accessed 16 October 2023].
- Durmisevic, E. (2018), *WP3 – Reversible Building Design Guidelines*, BAMB. [Online] Available at: bamb2020.eu/wp-content/uploads/2018/12/Reversible-Building-Design-guidelines-and-protocol.pdf [Accessed 16 October 2023].
- Durmisevic, E. (2006), *Transformable building structures – Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction*, Cedris M&CC, Delft. [Online] Available at: repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A9d2406e5-0cce-4788-8ee0-c19cbf38ea9a [Accessed 16 October 2023].
- EEA – European Environment Agency (2021), *Growth without economic growth – Narratives for Change*. [Online] Available at: eea.europa.eu/downloads/eed0c89209641548564b046bca43e/1617707707/growth-without-economic-growth.pdf [Accessed 16 October 2023].
- EEA – European Environment Agency (1998), "Environmental Risk Assessment – Approaches, Experiences and Information Sources", in *eea.europa.eu*, 24/03/1998. [Online] Available at: eea.europa.eu/publications/GH-07-97-595-EN-C2 [Accessed 16 October 2023].
- Ellen MacArthur Foundation (2015), *Delivering the Circular Economy – A Toolkit for Policymakers*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/a-toolkit-for-policymakers [Accessed 16 October 2023].
- Ellen MacArthur Foundation (2010), *Towards the Circular Economy – Economic and business rationale for an accelerated transition*. [Online] Available at: werktrends.nl/app/uploads/2015/06/Rapport_McKinsey-Towards_A_Circular_Economy.pdf [Accessed 16 October 2023].
- EPA – Environment Protection Agency (2019), *Guidelines for Human Exposure Assessment*, Risk Assessment Forum, EPA/100/B-19/001, U.S. Environment Protection Agency, Washington (DC). [Online] Available at: epa.gov/sites/production/files/2020-01/documents/guidelines_for_human_exposure_assessment_final2019.pdf [Accessed 16 October 2023].
- EPA – Environment Protection Agency (2016a), *Ecological Risk Assessment*. [Online] Available at: epa.gov/risk/ecological-risk-assessment [Accessed 16 October 2023].
- EPA – Environment Protection Agency (2016b), *Human Health Risk Assessment*. [Online] Available at: epa.gov/risk/human-health-risk-assessment [Accessed 16 October 2023].
- EPA – Environment Protection Agency (2011), *Exposure Factors Handbook*, U.S. Environment Protection Agency, Washington (DC). [Online] Available at: epa.gov/expobox/exposure-factors-handbook-2011-edition [Accessed 16 October 2023].
- EPA – Environment Protection Agency (2003), *Framework for cumulative risk assessment*, Risk Assessment Forum, EPA/630/P-02/001F, U.S. Environment Protection Agency, Washington (DC). [Online] Available at: epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/frmwrk_cum_risk_assmnt.pdf [Accessed 16 October 2023].
- EPA – Environment Protection Agency (1998), *Guidelines for Ecological Risk Assessment*, Risk Assessment Forum, EPA/630/R-95/002F, U.S. Environment Protection Agency, Washington (DC). [Online] Available at: epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/eco_risk_assessment1998.pdf [Accessed 16 October 2023].
- Eunomia (2020), *Plastics – Can Life Cycle Assessment Rise to the Challenge? – How to critically assess LCA for policy making*. [Online] Available at: eunomia.co.uk/reports-tools/plastics-can-life-cycle-assessment-rise-to-the-challenge/ [Accessed 16 October 2023].
- European Commission (2021a), *New European Bauhaus – Shaping more beautiful, sustainable and inclusive forms of living together*. [Online] Available at: europa.eu/new-european-bauhaus/index_en [Accessed 16 October 2023].
- European Commission (2021b), *Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods*. [Online] Available at: circabc.europa.eu/ui/group/6e9b7f79-da96-4a53-956f-e8f62c9d7fed/library/537534a4-9c76-40a1-b488-e9127db2befd/details [Accessed 16 October 2023].
- European Commission (2021c), *Commission recommendation of 16.12.2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations*, document C(2021)9332, 9332 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI_COM%3AC%282021%299332 [Accessed 16 October 2023].
- European Commission (2020a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives*, document 52020DC0662, 662 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662 [Accessed 16 October 2023].
- European Commission (2020b), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A new EU Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe, document 52020DC0098, 98 final*. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN [Accessed 16 October 2023].
- European Commission (2020c), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Europe's moment – Repair and Prepare for the Next Generation*, document 52020DC0456, 456 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0456&qid=1700296616928 [Accessed 16 October 2023].
- European Commission (2020d), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the*

Committee of the Regions – EU Biodiversity Strategy for 2030 – Bringing nature back into our lives, document 52020DC0380, 380 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0380 [Accessed 16 October 2023].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN [Accessed 16 October 2023].

European Commission (2015), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Closing the Loop – An EU action plan for the Circular Economy*, document 52015DC0614, 614 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614 [Accessed 16 October 2023].

European Commission (2009), *Directive 2009/29/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading scheme of the Community*, document 32009L0029, L 140/63. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0029 [Accessed 16 October 2023].

European Commission (2003), *Communication from the Commission to the Council and the European Parliament – Integrated Product Policy – Building on Environmental Life-Cycle Thinking*, document 52003DC0302, 0302 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52003DC0302 [Accessed 16 October 2023].

Ferrante, T., Romagnoli, F. and Villani, T. (2023), “Sviluppo urbano sostenibile – Organizzazione di contenuti informativi per la transizione verso i Distretti a Energia Positiva | Sustainable urban development – Organizing information content for the transition to Positive Energy Districts”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 191-204. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13162023 [Accessed 16 October 2023].

Ferrara, M. and Squatrito, A. (2022), “L’innovazione design-driven dei materiali circolari a base biologica – Strategie e competenze per la progettazione | Design-driven innovation of bio-based circular materials – Design strategies and skills”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 11, pp. 288-299. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11262022 [Accessed 16 October 2023].

Fioramonti, L. (2021), “Prefazione”, in Butera, F. M. (2023), *Affrontare la Complessità – Per governare la transizione ecologica*, Edizioni Ambiente, Milano, pp. 9-11.

Friedman, T. L. (2016), *Thank You for Being Late – An Optimist’s Guide to Thriving in the Age of Accelerations*, Picador, New York.

Gaspari, J., Marchi, L., Oberosler, C. and Antonini, E. (2022), “Strumenti di monitoraggio per abitare il risparmio energetico nell’edilizia sociale | Monitoring tools as energy saving enablers in social housing context”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 136-145. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12122022 [Accessed 16 October 2023].

Ghosh, A. (2017), *La grande cecità – Il cambiamento climatico e l’impensabile*, Neri Pozza, Vicenza.

Gonzalez, M. and Navarro, J. (2006), “Assessment of the decrease of CO₂ emission in the construction field through the selection materials – Practical case study of three houses of low environmental impact”, in *Building and Environment*, vol. 41, issue 7, pp. 902-909. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006 [Accessed 16 October 2023].

Gregg, E. J., Christensen, V., Nichol, L., Martone, R. G., Markel, R. W., Watson, J. C., Harley, C. D. G., Pakhomov, E. A., Shurin, J. B. and Chan, K. M. A. (2020), “Cascading social-ecological costs and benefits triggered by a recover-

ing keystone predator”, in *Science*, vol. 368, issue 6496, pp. 1243-1247. [Online] Available at: doi.org/10.1126/science.aay5342 [Accessed 16 October 2023].

Groen, E. A., Bokkers, E. A. M., Heijungs, R. and de Boer, I. J. M. (2017), “Methods for global sensitivity analysis in life cycle assessment”, in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, pp. 1125-1137. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-016-1217-3 [Accessed 16 October 2023].

Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T. and Rydberg, T. (2011), “Life Cycle Assessment – Past, present, and future”, in *Environmental Science & Technology*, vol. 45, issue 1, pp. 90-96. [Online] Available at: doi.org/10.1021/es101316v [Accessed 16 October 2023].

Habraken, N. J. (1972), *Supports – An alternative to mass housing*, Architectural Press, London.

Haines-Young, R. and Potschin, M. (2010), “The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being”, in Raffaelli, D. G. and Frid, C. L. J. (eds), *Ecosystem Ecology – A New Synthesis*, Cambridge University Press, pp. 110-139. [Online] Available at: doi.org/10.1017/CBO9780511750458.007 [Accessed 16 October 2023].

Hammond, G. P. and Jones, C. I. (2008), “Embodied energy and carbon in construction materials”, in *Proceedings of the Institution of Civil Engineering | Energy*, vol. 161, issue 2, pp. 87-98. [Online] Available at: doi.org/10.1680/enr.2008.161.2.87 [Accessed 16 October 2023].

Harrison, P. A., Dunford, R., Barton, D. N., Kelemen, E., Martín-López, B., Norton, L., Termansen, M., Saarikoski, H., Hendriks, K., Gómez-Baggethun, E., Czúcz, B., García-Llorente, M., Howard, D., Jacobs, S., Karlsen, M., Kopperoinen, L., Madsen, A., Rusch, G., van Eupen, M. and Zilian, G. (2018), “Selecting methods for ecosystem service assessment – A decision tree approach”, in *Ecosystem Services*, vol. 29, pp. 481-498. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.016 [Accessed 16 October 2023].

Holsman, K., Samhouri, J., Cook, G., Hazen, E., Olsen, E., Dillard, M., Kasperski, S., Gaichas, S., Kelble, C. R., Fogarty, M. and Andrews, K. (2017), “An ecosystem-based approach to marine risk assessment”, in *Ecosystem Health and Sustainability*, vol. 3, issue 1, article e12056, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ehs2.1256 [Accessed 16 October 2023].

Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas J., Landis, E., Mcleod, E., Pidgeon, E. and Simpson, S. (2017), “Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation”, in *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 15, issue 1, pp. 42-50. [Online] Available at: doi.org/10.1002/fee.1451 [Accessed 16 October 2023].

Igos, E., Benetto, E., Meyer, R., Baustert, P. and Othoniel, B. (2019), “How to treat uncertainties in life cycle assessment studies?”, in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 24, pp. 794-807. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-018-1477-1 [Accessed 16 October 2023].

IGS – Independent Group of Scientists appointed by the Secretary-General (2023), *Global Sustainable Development Report 2023 – Times of crisis, times of change – Science for accelerating transformations to sustainable development*, United Nations, New York. [Online] Available at: sdgs.un.org/sites/default/files/2023-09/FINAL%20GSDR%2023-Digital%20110923_1.pdf [Accessed 16 October 2023].

IPBES – Intergovernmental Science-Policy Panel on Biodiversity and Ecosystem Services (2016a), *Preliminary guide regarding diverse conceptualization of multiple values of nature and its benefits, including biodiversity and ecosystem functions and services (deliverable 3 d)*, IPBES/4/INF/13. [Online] Available at: ipbes.net/sites/default/files/downloads/IPBES-4-INF-13_EN.pdf [Accessed 16 October 2023].

IPBES – Intergovernmental Science-Policy Panel on Biodiversity and Ecosystem Services (2016b), *The methodological assessment report on scenarios and models of biodiversity and ecosystem services*. [Online] Available at: doi.org/10.5281/zenodo.3235429 [Accessed 16 October 2023].

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), *Climate Change 2023 – Synthesis Report – Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Online] Available at: doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647 [Accessed 16 October 2023].

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2018), *Global warming of 1.5 °C – An IPCC Special Report*. [Online] Available at: ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf [Accessed 16 October 2023].

Kahneman, D. (2007), *Economia della felicità*, Il Sole 24 Ore, Milano.

Kasper, M. and Stroomer, E. (2021), “Moltiplicare le vite dei tessuti – Raccolta e riciclo dei tessuti nell’Africa urbanizzata | Multiplying textile lives – Textile collection and recycling in urban Africa”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 9, pp. 224-231. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/922021 [Accessed 16 October 2023].

Koellner, T., Baan, L., Beck, T., Brandão, M., Civit, B., Margni, M., Canals, L. M., Saad, R., Souza, D. M. and Müller-Wenk, R. (2013), “UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA”, in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, issue 6, pp. 1188-1202. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-013-0579-z [Accessed 16 October 2023].

Koellner, T., Bonn, A., Arnold, S., Bagstad, K. J., Fridman, D., Guerra, C. A., Kastner, T., Kissinger, M., Kleeemann, J., Kuhlicke, C., Liu, J., López-Hoffman, L., Marques, A., Martín-López, B., Schulp, C. J. E., Wolff, S. and Schröter, M. (2019), “Guidance for assessing interregional ecosystem service flows”, in *Ecological Indicators*, vol. 105, pp. 92-106. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.046 [Accessed 16 October 2023].

Kovach, R. P., Dunham, J. B., Al-Chokhachy, R., Snyder, C. D., Letcher, B. H., Young, J. A., Beever, E. A., Pederson, G. T., Lynch, A. J., Hitt, N. P., Konrad, C. P., Jaeger, K. L., Rea, A. H., Sepulveda, A. J., Lambert, P. M., Stoker, J., Giersch, J. J. and Muhlfeld, C. C. (2019), “An integrated framework for ecological drought across riverscapes of North America”, in *Bioscience*, vol. 69, pp. 418-431. [Online] Available at: doi.org/10.1093/biosci/biz040 [Accessed 16 October 2023].

Kreissl, A. (2021), “Risorsa materasso – Il potenziale dei materiali di scarto | Resource mattress – The potential of refuse materials”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 9, pp. 184-193. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/9182021 [Accessed 16 October 2023].

Kuittinen, M. and Linkosalmi, L. (2015), *Compiling environmental product declarations for wood-based construction products assessment and documentation*, Aalto University Publication Series, Aalto.

Langston, Y. L. and Langstone C. A. (2008), “Reliability of building embodied energy modelling – An analysis of 30 Melbourne case studies”, in *Construction Management and Economics*, vol. 26, issue 2, pp. 147-160. [Online] Available at: doi.org/10.1080/01446190701716564 [Accessed 16 October 2023].

Latouche, S. (2015), *Breve trattato sulla decrescita serena e come sopravvivere allo sviluppo*, Bollati Boringhieri, Milano.

Lauria, M. and Azzalin, M. (2021), “Paradigmi | Paradigms”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 9, pp. 12-21. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/912021 [Accessed 16 October 2023].

Lloyd, S. M. and Ries, R. (2007), “Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment – A Survey of Quantitative Approaches”, in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 11, issue 1, pp. 161-179. [Online] Available at: doi.org/10.1162/jiec.2007.1136 [Accessed 16 October 2023].

Losasso, M. and Verde, S. (2020), “Strategie progettuali di adattamento urbano ed edilizio in scenari di multirischio

- ambientale | Design strategies for urban and building adaptation in environmental multi-risk scenarios”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 64-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/862020 [Accessed 16 October 2023].
- Lueddeckens, S., Saling, P. and Guenther, E. (2020), “Temporal issues in life cycle assessment – A systematic review”, in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, issue 8, pp. 1385-1401. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-020-01757-1 [Accessed 16 October 2023].
- Maes, J., Teller, A., Erhard, M., Condé, S., Vallecillo, S., Barredo, J. I., Paracchini, M. L., Abdul Malak, D., Trombetti, M., Vigiak, O., Zulian, G., Addamo, A. M., Grizzetti, B., Somma, F., Hagyo, A., Vogt, P., Polce, C., Jones, A., Marin, A. I., Ivits, E., Mauri, A., Rega, C., Czucz, B., Ceccherini, G., Pisoni, E., Ceglar, A., De Palma, P., Cerrani, I., Meroni, M., Caudullo, G., Lugato, E., Vogt, J. V., Spinoni, J., Cammalleri, C., Bastrup-Birk, A., San Miguel, J., San Román, S., Kristensen, P., Christiansen, T., Zal, N., de Roo, A., Cardoso, A. C., Pistocchi, A., Del Barrio Alvalros, I., Tsiamis, K., Gervasini, E., Deriu, I., La Notte, A., Abad Viñas, R., Vizzarri, M., Camia, A., Robert, N., Kakoulaki, G., Garcia Bendito, E., Panagos, P., Ballabio, C., Scarpa, S., Montanarella, L., Orgiazzi, A., Fernandez Ugalde, O. and Santos-Martin, F. (2020), *Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services – An EU ecosystem assessment*, Publications Office of the European Union, Ispra, EUR 30161 EN, JRC120383. [Online] Available at: doi.org/10.2760/757183 [Accessed 16 October 2023].
- Marji, N., Shawash, J. and Marji, N. (2021), “Human-made – I rifiuti come risorsa per la rigenerazione urbana nel campo profughi di Jabal al Jofeh | Human-made – Waste as a resource for urban regeneration in Jabal al Jofeh refugee camp”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 9, pp. 134-145. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/9132021 [Accessed 16 October 2023].
- McDonough, W. and Braungart, M. (2013), *The Upcycle – Beyond Sustainability – Designing for Abundance*, North Point Press, USA.
- McDonough, W. and Braungart, M. (2002), *Cradle to Cradle – Remaking the Way We Make Things*, North Point Press, USA.
- MEA – Millennium Ecosystem Assessment (2005), *Ecosystems and Human Well-being – Synthesis*, Island Press, Washington (DC). [Online] Available at: millenniumassessment.org/en/Synthesis.aspx [Accessed 16 October 2023].
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. and Behrens III, W. W. (1972), *The Limits to Growth*, Universe Books, New York.
- Morin, E. (2020), “Per l’uomo è tempo di ritrovare sé stesso”, interview by Scialoja, A., in *Avvenire.it*, 15/04/2020. [Online] Available at: avvenire.it/agora/pagine/per-luomoto-tempo-di-ritrovare-se-stesso [Accessed 16 October 2023].
- Mouton, L., Allacker, K. and Röck, M. (2023), “Bio-based building material solutions for environmental benefits over conventional construction products – Life cycle assessment of regenerative design strategies (1/2)”, in *Energy and Buildings*, vol. 282, article 112767, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112767 [Accessed 16 October 2023].
- Muazu, R. I., Rothman, R. and Maltby, L. (2021), “Integrating life cycle assessment and environmental risk assessment – A critical review”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 293, article 126120, p. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126120 [Accessed 16 October 2023].
- Ness, D. (2021), “Dalla nuova edilizia alla rigenerazione – Può il Nuovo Bauhaus ridefinire l’architettura e dare risposte ai cambiamenti globali? | The shift from new build to regeneration – Can the New Bauhaus transform architecture and design to meet global challenges?”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 9, pp. 22-31. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/922021 [Accessed 16 October 2023].
- Neugarten, R. A., Langhammer, P. F., Osipova, E., Bagstad, K. J., Bhagabati, N., Butchart, S. H. M., Dudley, N., Elliott, V., Gerber, L. R., Gutierrez Arrellano, C., Ivanić, K.-Z., Ketunen, M., Mandle, L., Merriman, J. C., Mulligan, M., Peh, K. S.-H., Raudsepp-Hearne, C., Semmens, D. J., Stolton, S. and Willcock, S. (2018), *Tools for measuring, modelling, and valuing ecosystem services – Guidance for Key Biodiversity Areas, natural World Heritage sites, and protected areas*, IUCN | International Union for Conservation of Nature, Gland (Switzerland). [Online] Available at: doi.org/10.2305/IUCN.CH.2018.PAG.28.en [Accessed 16 October 2023].
- Olivieri, F. (2022), “Progettazione simbiotica per un ecosistema urbano resiliente | Symbiotic design for a resilient urban ecosystem”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 40-49. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1132022 [Accessed 16 October 2023].
- Paoletti, I. (2017), “Involucri responsivi – Sperimentazioni con modelli a comportamento naturale | Responsive Envelopes – Experimentations by natural Role Models”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 2, pp. 213-218. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/2282017 [Accessed 16 October 2023].
- Pauli, G. (2009), *Blue Economy*, Edizioni Ambiente, Milano.
- Potschin-Young, M., Haines-Young, R., Görg, C., Heink, U., Jax, K. and Schleyer, C. (2018), “Understanding the role of conceptual frameworks – Reading the ecosystem service cascade”, in *Ecosystem Services*, vol. 29, part C, pp. 428-440. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.05.015 [Accessed 16 October 2023].
- Prado, V., Cinelli, M., Ter Haar, S. F., Ravikumar, D., Heijungs, R., Guinée, J. and Seager, T. P. (2020), “Sensitivity to weighting in life cycle impact assessment (LCIA)”, in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, pp. 2393-2406. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-019-01718-3 [Accessed 16 October 2023].
- Pratesi, I. (ed.) (2020), *Pandemie, l’Effetto Boomerang della Distruzione degli Ecosistemi – Tutelare la Salute Umana Conservando la Biodiversità*, WWF Italia Onlus, Roma. [Online] Available at: wwfit.awsassets.panda.org/downloads/pandemie_e_distruzione_degli_ecosistemi.pdf [Accessed 16 October 2023].
- Preiser, R., Biggs, R., De Vos, A. and Folke, C. (2018), “Social-ecological systems as complex adaptive systems – Organizing principles for advancing research methods and approaches”, in *Ecology and Society*, vol. 23, issue 4, article 46, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.5751/ES-10558-230446 [Accessed 16 October 2023].
- Raworth, K. (2017), *Doughnut Economics – Seven ways to think like a 21st-century economist*, Random House, London.
- Reina, V., Kephelopoulou, S., Zenié, I., Pina De Menezes Borges, M., Del Rio Martin, A., Radonnikovic, A. and Stecca, L. (2014), *Harmonising and integrating existing exposure factors systems world-wide – Feasibility study report*, EUR 26915 – JRC91832, Publications Office of the European Union. [Online] Available at: doi.org/10.2788/20871 [Accessed 16 October 2023].
- Remme, R., de Nijs, T. and Paulin, M. (2018), *Natural Capital Model – Technical documentation of the quantification, mapping and monetary valuation of urban ecosystem services*, RIVM report 2017-0040. [Online] Available at: doi.org/10.21945/RIVM-2017-0040 [Accessed 16 October 2023].
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Druke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., Petri, S., Porkka, M., Rahmstorf, S., Schaphoff, S., Thonicke, K., Tobian, A., Virkki, V., Wang-Erlandsson, L., Weber, L. and Rockström, J. (2023), “Earth beyond six of nine planetary boundaries”, in *Science Advances*, vol. 9, issue 37, article eadh2458, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1126/sciadv.adh2458 [Accessed 16 October 2023].
- Romano, R., Belardi, E., Gallo, P. and Distefano, D. L. (2022), “Sistemi costruttivi low-tech 4.0 – Innovazione di prodotto-processo BIM-based per la prefabbricazione in cartone ondulato | 4.0 low-tech building systems – BIM-based product-process innovation for corrugated cardboard prefabrication”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 158-167. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12142022 [Accessed 16 October 2023].
- Rosenthal, A., Verutes, G., McKenzie, E., Arkema, K. K., Bhagabati, N., Bremer, L. L., Olwero, N. and Vogl, A. L. (2015), “Process matters – A framework for conducting decision-relevant assessments of ecosystem services”, in *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, vol. 11, issue 3, pp. 190-204. [Online] Available at: doi.org/10.1080/21513732.2014.966149 [Accessed 16 October 2023].
- Runting, R. K., Bryan, B. A., Dee, L. E., Maseyk, F. J. F., Mandle, L., Hamel, P., Wilson K. A., Yetka, K., Possingham, H. P. and Rhodes, J. R. (2017), “Incorporating climate change into ecosystem service assessments and decisions – A review supplementary materials”, in *Global Change Biology*, vol. 23, issue 1, pp. 28-41. [Online] Available at: doi.org/10.1111/gcb.13457 [Accessed 16 October 2023].
- Santos Malaguti de Sousa, C., Queiroz Ferreira Barata, T., Dutra Profirio de Souza, C. and de Melo, F. G. (2023), “Gestione delle foreste urbane – Percorsi tecnologici design-driven per la valorizzazione dei rifiuti da potatura | Urban forests management – Design-driven technological routes for wood waste valuing”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 291-300. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13252023 [Accessed 16 October 2023].
- Scalisi, F. and Ness, D. (2022), “Simbiosi tra vegetazione e costruito – Un approccio olistico, sistemico e multilivello | Symbiosis of greenery with built form – A holistic, systems, multi-level approach”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 26-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1122022 [Accessed 16 October 2023].
- Scalisi, F. and Sposito, C. (2021), “Strategie e approcci ‘green’ – Un contributo dall’off-site e dall’upcycling dei container marittimi dismessi | Green strategies and approaches – A contribution from the off-site and upcycling of discarded shipping containers”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 10, pp. 92-119. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1092021 [Accessed 16 October 2023].
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity and the United Nations Environment Programme – World Conservation Monitoring Centre (2012), *Best policy guidance for the integration of biodiversity and ecosystem services in standards*, Montreal. [Online] Available at: cbd.int/doc/publications/cbd-ts-73-en.pdf [Accessed 16 October 2023].
- Simmons, D. C., Dauwe, R., Gowland, R., Gyenes, Z., King, A. G., Riedstra, D. and Schneiderbauer, S. (2017), “Qualitative and quantitative approaches to risk assessment”, in Poljanšek, K., Marin Ferrer, M., De Groeve, T. and Clark, I. (eds), *Science for Disaster Risk Management 2017 – Knowing Better and Losing Less*, Publications Office of the European Union, pp. 44-130. [Online] Available at: doi.org/10.2788/842809 [Accessed 16 October 2023].
- Small, N., Munday, M. and Durance, I. (2017), “The challenge of valuing ecosystem services that have no material benefits”, in *Global Environmental Change*, vol. 44, pp. 57-67. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.03.005 [Accessed 16 October 2023].
- Soergel, B., Kriegl, E., Weindl, I., Rauner, S., Dirmaichner, A., Ruhe, C., Hofmann, M., Bauer, N., Bertram, C., Bodirsky, B. L., Leimbach, M., Leininger, J., Levesque, A., Luderer, G., Pehl, M., Wings, C., Baumstark, L., Beier, F., Dietrich, J. P., Humpenöder, F., von Jetze, P., Klein, D., Koch, J., Pietzcker, R., Streffler, J., Lotze-Campen H. and Popp, A. (2021), “A sustainable development pathway for climate action within the UN 2030 Agenda”, in *Nature Climate Change*, vol. 11, issue 8, pp. 656-664. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41558-021-01098-3 [Accessed 16

October 2023].

Sommariva, E., Canessa, N. V. and Tucci, G. (2022), “Azioni verdi per città innovative – Il nuovo paesaggio agroalimentare | Green actions for innovative cities – The new agri-food landscape”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 150-161. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11132022 [Accessed 16 October 2023].

Sposito, C. and Scalisi, F. (2020), “Ambiente costruito e sostenibilità – Materiali riciclati e Design for Disassembly tra ricerca e buone pratiche | Built environment and sustainability – Recycled materials and Design for Disassembly between research and good practices”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 8, pp. 106-117. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8102020 [Accessed 16 October 2023].

Sposito, C. and Scalisi, F. (2019), “A possible tool for the choice of building materials – The Environmental Product Declaration (EPD)”, in Bisson, M. (ed.), *MDA | 3rd International Conference on Environmental Design, Marsala 03-04 October 2019*, Palermo University Press, Palermo, pp. 189-199. [Online] Available at: academia.edu/40469357/A_possible_tool_for_the_choice_of_building_materials_the_Environmental_Product_Declaration_EP [Accessed 16 October 2023].

Stelzenmüller, V., Coll, M., Mazaris, A. D., Giakoumi, S., Katsanevakis, S., Portman, M. E., Degen, R., Mackelworth, P., Gimpel, A., Albano, P. G., Almpnidou, V., Claudet, J., Essl, F., Evagelopoulou, T., Heymans, J. J., Genov, T., Kark, S., Micheli, F., Pennino, M. G., Rilov, G., Rumes, B., Steenbeek, J. and Rumes, B. (2018), “A risk-based approach to cumulative effect assessments for marine management”, in *Science of the Total Environment*, vol. 612, pp. 1132-1140. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.289 [Accessed 16 October 2023].

Sullivan, S. and Hannis, M. (2017), “Mathematics-maybe, but not money – On balance sheets, numbers and nature in ecological accounting”, in *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, vol. 30, issue 7, pp. 1459-1480. [Online] Available at: doi.org/10.1108/AAAJ-06-2017-2963 [Accessed 16 October 2023].

Świąder, M., Lin, D., Szymon, S., L Kazak, J. K., Iha, K., van Hoof, J., Belčáková, I. and Altiok, S. (2020), “The application of ecological footprint and biocapacity for environmental carrying capacity assessment – A new approach for European cities”, in *Environmental Science and Policy*, vol. 105, pp. 56-74. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.envsci.2019.12.010 [Accessed 16 October 2023].

Taelman, S., Sanjuan-Delmás, D., Tonini, D. and Dewulf, J. (2020), “An operational framework for sustainability assessment including local to global impacts – Focus on waste management systems”, in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 162, article 104964, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104964 [Accessed 16 October 2023].

Tajima, S. and Nasu, S. (2020), “Architettura mobile off-grid – Uno strumento possibile per la resilienza delle comunità rurali in caso di calamità naturali | Mobile Off-grid Architecture – A potential tool for the resilience of rural communities in the event of natural disasters”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 8, pp. 118-127. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8112020 [Accessed 16 October 2023].

TEEB – The Economics of Ecosystems and Biodiversity (2013), *Guidance Manual for TEEB Country Studies – Version 1*. [Online] Available at: teebweb.org/media/2013/10/TEEB_GuidanceManual_2013_1.0.pdf [Accessed 16 October 2023].

TEEB – The Economics of Ecosystems and Biodiversity (2011), *TEEB Manual for Cities – Ecosystem Services in Urban Management*. [Online] Available at: teebweb.org/publications/other/teeb-cities/ [Accessed 16 October 2023].

Thormark, C. (2006), “The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building”, in *Building and Environment*, vol. 41, issue 8, pp. 1019-1026. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8112020 [Accessed 16 October 2023].

Tucci, F. and Giampaolletti, M. (2022), “Soluzioni green per la sottrazione e lo stoccaggio di carbonio nei distretti urbani | Green solutions for removing and storing carbon in urban districts”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 11, pp. 202-213. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11182022 [Accessed 16 October 2023].

Tucci, F. and Sposito, C. (eds) (2020), *Resilience between mitigation and adaptation*, Project – Essays and Researches publishing series, vol. 3, Palermo University Press, Palermo. [Online] Available at: unipapress.com/book/resilience-ao-between-mitigation-and-adaptation/ [Accessed 16 October 2023].

Tucci, F., Cecafosso, V., Altamura, P. and Giampaolletti, M. (2022), “Simulazione e modellazione per l’adattamento e la mitigazione climatica – Esperienze di riqualificazione ambientale a Roma | Simulation and modelling for climate adaptation and mitigation – Experiences of environmental renovation in Rome”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 106-121. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12102022 [Accessed 16 October 2023].

Tucci, G. and Carlo Ratti Associati (2023), “La tecnologia come abilitatore di un nuovo ecosistema urbano responsivo – Intervista a Carlo Ratti (CRA Studio) | Technology as an enabler of a new ecosystem responsive urbanism – Interview with Carlo Ratti (CRA Studio)”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 190-201. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12172022 [Accessed 16 October 2023].

UN – General Assembly (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 16 October 2023].

UN – United Nations (1992), *Agenda 21 – United Nations Conference on Environment and Development – Rio de Janeiro, Brazil, 3 to 14 June 1992*. [Online] Available at: sdgs.un.org/sites/default/files/publications/Agenda21.pdf [Accessed 16 October 2023].

UNDESA – United Nations Department of Economic and Social Affairs (2023), *Global SDG Indicators Data Platform*. [Online] Available at: unstats.un.org/sdgs/data-portal [Accessed 16 October 2023].

Valente, R., Losco, S., Bosco, R. and Giacobbe, S. (2022), “Il progetto di infrastrutture verdi per le acque piovane – Note di metodo da un caso studio | Green stormwater infrastructures research through design – Method notes from a case study”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 11, pp. 192-201. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11172022 [Accessed 16 October 2023].

Value of Nature to Canadians Study Taskforce (2017), *Completing and Using Ecosystem Service Assessment for Decision-Making – An Interdisciplinary Toolkit for Managers and Analysts*, Federal, Provincial, and Territorial Governments of Canada, Ottawa (ON).

Van der Biest, K., Meire, P., Schellekens, T., D’hondt, B., Bonte, D., Vanagt, T. and Ysebaert, T. (2020), “Aligning biodiversity conservation and ecosystem services in spatial planning – Focus on ecosystem processes”, in *Science of the Total Environment*, vol. 712, article 136350, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136350 [Accessed 16 October 2023].

Violano, A., Cannaviello, M. and Del Prete, S. (2021), “Materiali rigenerativi bio-based – Una proposta innovativa per il packaging e i prodotti da costruzione | Bio-based circular materials – Innovative packaging and construction products”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 9, pp. 244-253. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/9242021 [Accessed 16 October 2023].

WCED – World Commission for Environment and Development (1987), *Our Common Future World*, Brundtland Report. [Online] Available at: are.admin.ch/are/en/home/media/publications/sustainable-development/brundtland-report.html [Accessed 16 October 2023].

WEF – World Economic Forum (2023), *The Global Risk*

Report 2023 – 18th Edition – Insight Report. [Online] Available at: weforum.org/reports/global-risks-report-2023/ [Accessed 16 October 2023].

WEF – World Economic Forum (2021), “This is how climate change could impact the global economy”, in *weforum.org*, 28/06/2021. [Online] Available at: weforum.org/agenda/2021/06/impact-climate-change-global-gdp/ [Accessed 16 October 2023].

Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., Hyde, K. J. W., Morrelli, T. L., Morissette, J. T., Muñoz, R. C., Pershing, A. J., Peterson, D. L., Poudel, R., Staudinger, M. D., Sutton-Grier, A. E., Thompson, L., Vose, J., Weltzin, J. F. and Powys Whyte, K. (2020), “Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States”, in *Science of the Total Environment*, vol. 733, article 137782, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782 [Accessed 16 October 2023].

WHO – World Health Organization (2021), *WHO human health risk assessment toolkit – Chemical Hazards, IPCS harmonization project document, no. 8*, World Health Organization, Geneva. [Online] Available at: who.int/publications/i/item/9789240035720 [Accessed 16 October 2023].

WMO – World Meteorological Organization (2021), “Weather-related disasters increase over past 50 years, causing more damage but fewer deaths”, in *public.wmo.int*, 31/08/2021. [Online] Available at: public.wmo.int/en/media/press-release/weather-related-disasters-increase-over-past-50-years-causing-more-damage-fewer [Accessed 16 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	24 October 2023
Revised	31 October 2023
Accepted	04 November 2023
Published	31 December 2023

SCHEMI PER LA PROGETTAZIONE ESPERIENZIALE

Combinare pensiero modulare e teoria integrale

EXPERIENTIAL DESIGN SCHEMAS

Combining modular thinking with integral theory

Mark DeKay, Stefano Tornieri

ABSTRACT

Alcuni aspetti del concetto di modularità, introdotto primariamente nel campo dell'informatica da David L. Parnas (1972), hanno costituito la base per la modularità in ambito educativo: coesione, disaccoppiamento, facilità di modifica e replicabilità sono infatti caratteristiche del modulo informatico che ben si applicano anche al contesto didattico. È con questa attitudine pedagogica, legata al sistema didattico modulare, che nasce Experiential Design Schemas, un lavoro metodologicamente legato alla teoria integrale di Ken Wilber (2007) e applicato all'architettura tramite un'importante sezione di schemi progettuali. Organizzato anche per finalità 'operative', l'obiettivo è fornire strumenti analitici e progettuali per delineare la capacità delle scelte formali e compositive di plasmare le forze ambientali a scopo esperienziale ed emozionale.

Certain aspects of the concept of modularity, introduced primarily in the field of computer science by David L. Parnas (1972), have formed the basis for modularity in education: cohesion, decoupling, ease of modification, replicability are characteristics of the computer module that also apply well to the educational context. It is with this pedagogical attitude related to the modular didactic system that Experiential Design Schemas was born, a work methodologically related to integral theory by Ken Wilber (2007) and applied to architecture through an important section of design schemes. Also organised with a practice intention, the aim is to provide analytical and design tools that outline the capacity of formal and compositional choices to shape environmental forces for the purpose of experiential and emotional effects.

KEYWORDS

schema, esperienza sensoriale, modularità, pedagogia, benessere

schemas, sensorial experience, modularity, pedagogy, well-being

Mark DeKay, Architect and Professor at the University of Tennessee (USA), specialising in sustainable design theory and tools. His research topics include environmental design, pedagogy, architectural experience and sustainability. His works include *Integral Sustainable Design – Transformative Perspectives* (2011) and *Sun, Wind, and Light – Architectural Design Strategies*, 3rd edition (2014). E-mail: mdekay@utk.edu

Stefano Tornieri is an Architect and PhD in Architectural and Urban Composition at the Iuav University of Venice (Italy). From 2017 to 2023, he was a Research Fellow at IRIDE (Infrastructure Research Integral Design Environment) of the Iuav University of Venice. He is currently a Lecturer at LTU University of Technology in Luleå (Sweden). He was nominated for the EU Mies van der Rohe Award 2019 and was the curator of the Grenada Pavilion at the 17th Venice Architecture Biennale (2021). His research focuses on applying integral theory in landscape design and, in particular, on the systemic role of architecture in coastal and riverine production landscapes. E-mail: stornieri@iuav.it



Negli ultimi decenni, la ricerca scientifica nel campo neurologico ha sottolineato l'importanza della percezione multimodale ovvero degli effetti sulla percezione di eventi e oggetti del mondo che si osservano quando ci sono informazioni provenienti da più di una modalità sensoriale. La maggior parte di queste ricerche indica che a un certo punto dell'elaborazione percettiva le informazioni provenienti dalle varie modalità sensoriali vengono integrate da chi esperisce (Bertelson and de Gelder, 2004; Martín et alii, 2015): in altre parole le informazioni vengono combinate e trattate come una rappresentazione unitaria del mondo.

L'architettura, considerata in questo testo come spazio costruito, in quanto fisicamente visibile ed esperibile dall'uomo si manifesta nella percezione stessa poiché con l'esperienza si genera una fusione di spazi, di materiali, di luci e sensazioni epidermiche che portano a una conoscenza completa dell'architettura. Steven Holl (2004) in uno dei suoi testi più noti, il *Parallax – Architettura e Percezione*, scrive che nell'attraversare uno spazio avviene una fusione tra il soggettivo, le sensazioni provocate dall'attraversamento del luogo e l'oggettivo, ovvero la morfologia e la volumetria dello spazio stesso. Per Holl la logica progettuale alla base di ogni architettura deve essere strettamente legata alla percezione finale che si vuole ottenere dello stesso spazio architettonico; il progettista deve immaginarsi di percorrere lo spazio, prefigurandosi come sarà costruito, e provare quindi ad 'anticipare' le sensazioni e le emozioni che lo stesso potrà far scaturire.

Lo spazio, il colore, la luce, la geometria, il dettaglio e i materiali sono un esperimento continuo e una volta scelti e realizzati diventano una cosa sola, inscindibili nella condizione finale, provocando tutti insieme una certa percezione dello spazio. Questo aspetto della ricerca architettonica, più fenomenologico che tecnico, più plastico e formale che tipologico, è stato indagato maggiormente da architetti 'operanti', poco inclini alla pura teoria, come Alvaro Siza, Fernando Tavora, Jaques Herzog, Kazuyo Sejima, Tatiana Bilbao e Junya Ishigami, che hanno alimentato critiche delegittimando la scientificità della teoria espressa dalla capacità innata, dal talento, dalla produzione poetica.

Juhani Pallasmaa (2005; Pallasmaa et alii, 2013) in *The Eyes of the Skin* e in *Architecture and Neuroscience* ha perseguito la ricerca teorica sulla capacità dello spazio di essere emozionale, pervasivo e multisensoriale, offrendo validi supporti teorici a chi progetta con la parte più esperienziale e umana dell'architettura. A livello teorico il suo contributo è in parte opposto a quello degli studiosi della tipologia, del pattern, del modulo come unità di base per la creazione dell'architettura. Christopher Alexander, l'esponente più importante di questo filone, ha sviluppato un linguaggio architettonico il cui obiettivo era descrivere come un numero infinito di 'frasi' o edifici potesse essere prodotto da un numero finito di elementi (schemi) che esprimono la relazione tra lo spazio e gli eventi (Alexander et alii, 1977).

Per Alexander un 'linguaggio di modelli' non ha quindi solo il potere di generare disposizioni spaziali, ma è anche 'generativo come le lingue naturali'. Nei primi anni '60 Alexander discuteva con gli studenti la scomposizione di un problema complesso in singoli problemi adducendo che, risolvendo i singoli problemi, si potesse risolvere il

problema generale. Il processo teorizzato da Alexander è in realtà evolutivo e incrementale e arriva a una dimensione più completa e organica a partire dagli anni '80 nel volume *A New Theory of Urban Design* (Alexander et alii, 1988) e successivamente in *The Nature of Order* (Alexander, 2001). La propensione didattica e metodologica della teoria socio-spaziale di Alexander e l'approccio in prima persona, meno replicabile o generalizzabile dei fenomenologi, sembrano due mondi opposti.

Ricerche recenti che si sono focalizzate sulla dimensione fenomenologica, come il lavoro di Ila Bêka e Louise Lemoine (2023), hanno scelto di utilizzare l'audiovisivo come strumento di comunicazione, sebbene il risultato tenda spesso a enfatizzare il potenziale del mezzo cinematografico piuttosto che quello dell'architettura stessa. Gli studi tipologici, incentrati su schemi e moduli spaziali aggregabili invece si sono alimentati principalmente incrociando tecnologia e scienza delle costruzioni (Wallance, 2021; Hogan-O'Neill, 2021) o lavorando su evoluzioni di schemi planimetrici (Lechner, 2021; Bielefeld, 2016) lasciando una sensazione di sovrappeso teorico nonostante le intenzioni manualistiche e pedagogiche.

È in questo 'vuoto' tra i due approcci che si inserisce il volume *Experiential Design Schemas* (DeKay and Brager, 2023; Fig. 1), uno studio teorico che indaga il processo di progettazione a partire dall'esperienza emozionale (il fenomenologico) e la struttura come matrice o catalogo altamente razionale di schemi progettuali modulari (il tipologico). L'opera si concentra su come i progettisti possano orchestrare diverse esperienze di condizioni ambientali dinamiche per connettere gli esseri umani al ritmo della natura: propone una struttura complessa fatta di diagrammi, schemi e moduli che analizzano parti di edificio in relazione agli effetti spaziali, emozionali e sensitivi che producono (Fig. 2). Il testo elabora diverse prospettive, dalla fenomenologia dell'architettura alle discipline teoriche, dalla scienza delle costruzioni all'ingegneria e alla sanità, traducendole in un linguaggio 'pratico' utile alla progettazione.

Il volume indaga come i progettisti possano interpretare e comprendere l'esperienza soggettiva delle persone al fine di tradurla in soluzioni concrete a varie scale (Fig. 3). Le esperienze architettoniche – che sono analizzate nel quadro teorico dell'Integral Design come fenomeni vissuti individualmente, funzione neurobiologica, significato situato in luoghi particolari e archetipo in evoluzione – si fondano su una ricerca che prosegue gli studi applicativi della teoria della progettazione integrale come *Integral Sustainable Design – Transformative Perspectives* (DeKay, 2011) e *Sun, Wind & Light – Architectural Design Strategies* (DeKay and Brown, 2014).

La collaborazione con la coautrice del volume Gail Brager, ingegnere ambientale con importanti studi legati al comfort abitativo e alle performance degli edifici green, forse più nota come studiosa che ha trasformato l'analisi del comfort convenzionale in comfort adattivo (de Dear and Brager, 2001), ha prodotto un risultato complesso, poco accessibile alla prima lettura, che lavora sulla replicabilità di 'moduli esperienziali' chiamati schemi, esplicitando in modo innovativo come sistemi costruttivi, tecnologie e combinazioni di sistemi producano spesso verificate sensazioni positive, in

grado di oltrepassare la semplice linea del comfort minimo ed entrare nel campo emozionale (Fig. 4).

Un approccio di progettazione integrale all'esperienza architettonica | Nel tentativo di comprendere la sostanza dell'esperienza architettonica e le connessioni con la Natura negli edifici ci si trova di fronte, da un lato alla mancanza di linguaggio, concetti e terminologia chiari e specifici, dall'altro a un'ampia varietà di spiegazioni parziali da prospettive apparentemente inconciliabili, adottate da diversi studiosi e professionisti nel campo delle neuroscienze, della tipologia, della fenomenologia e della teoria culturale.

Da un'approfondita indagine DeKay e Brager (2023) hanno teorizzato che la varietà di idee sull'esperienza nelle arti, nelle scienze e nelle discipline umanistiche può essere mappata dalle quattro prospettive fondamentali introdotte dal filosofo Ken Wilber (2007): al livello più essenziale la sua Teoria Integrale organizza le prospettive che possono essere assunte su ciascun problema in una matrice, visualizzata in un diagramma a quadranti, secondo il modello AQAL (All Quadrants, All Levels; Fig. 5) che comprende anche le dimensioni degli stati, delle linee di sviluppo e delle tipologie. Wilber la descrive come una 'meta-teoria' e la propone come uno degli approcci più completi alla realtà che cerca di spiegare come tutte le forme di conoscenza ed esperienza possano essere coerentemente integrate.

Wilber (2007) parte dall'assunto che ogni mente, ogni teoria, è parziale e mai completamente corretta e quindi nessuno può rappresentare la piena interezza di un evento, qual'è un edificio¹. Nel considerare valida l'esperienza architettonica sia dal punto di vista soggettivo che da quello oggettivo, e dalle sue espressioni individuali e collettive come sempre presenti, il filosofo statunitense individua queste quattro prospettive: 1) la prospettiva esperienziale del sé individuale, della coscienza, dei sentimenti e dei pensieri; 2) la prospettiva comportamentale che impiega la scienza e l'ingegneria per osservare e misurare i correlati dell'esperienza vissuta nel mondo empirico; 3) la prospettiva culturale che situa l'esperienza individuale all'interno di visioni del mondo, narrazioni e significati simbolici; 4) la prospettiva dei sistemi che mappa flussi complessi, gerarchie e spazio in ecologie e contesti sociali, naturali e urbani. Apparentemente complessa, questa struttura è invece molto utile per attirare l'attenzione sulle opportunità e sui limiti delle prospettive individuali, che con i loro diversi metodi rivelano e allo stesso tempo oscurano aspetti dell'insieme. Ad esempio si può 'leggere' un edificio analizzandone le prestazioni energetiche (comportamenti), valutandolo positivamente quando efficiente, oppure studiarne la comunicazione narrativa radicata nel contesto urbano (culture), valutandolo negativamente per la sua discordanza.

Utilizzando questo approccio è possibile quindi analizzare esempi dei principali punti di vista sull'esperienza architettonica (DeKay and Brager, 2023) rispetto a:

1) Esperienze – Juhani Pallasmaa e i fenomenologi (Merleau-Ponty, 2003) adottano una prospettiva soggettiva in prima persona, apprezzando l'esperienza così come si presenta all'individuo nella coscienza; ciò esemplifica il 'regno I' della prospettiva delle esperienze in cui per essere conosciuto un abitante deve riferire i propri sentimenti;



EXPERIENTIAL DESIGN SCHEMAS

Mark DeKay Gail Brager

Fig. 1 | Cover of the book *Experiential Design Schemas: Meditation Hall, SAN Museum (2019)* in Wonju (Gangwon Province, South Korea), designed by Tadao Ando (credit: J. Jang, Image Joom).

2) *Comportamenti* – Harry F. Mallgrave (2015), Antonio Damasio (2010, 2018) e i neuroscienziati dell'architettura adottano una prospettiva oggettiva in terza persona che cerca spiegazioni per l'esperienza nelle loro origini biologiche, sviluppate evolutivamente; questo può essere considerato un 'regno IT' in cui i fondamenti della biologia e della fisica governano la 'prospettiva dei comportamenti', così chiamata perché i comportamenti

delle persone e delle cose nel mondo empirico possono essere osservati, misurati e pesati;
3) *Culture* – Lance LaVine (2001), un raro esempio di teorico che adotta una prospettiva culturale intersoggettiva in seconda persona plurale, ha condotto studi che connettono l'esperienza con significati legati alla struttura del luogo, emergente dalla specificità di una cultura inserita in un ambiente materiale e climatico; questo approccio occupa il

'terreno WE' in cui significato e appartenenza emergono all'interno delle conversazioni di comunità culturali di cui gli individui sono membri;
4) *Sistemi* – Grant Hildebrand (1991), Thomas Thiis-Evensen (1987) e i tipologici adottano un approccio più formalista che si avvicina a una prospettiva interoggettiva in terza persona in cui la modellazione fisica e l'organizzazione degli archetipi architettonici universali sono i motori dell'e-

sperienza umana; questo tipo di pensiero sistemico e multiscale definisce un 'terreno ITS' complesso e plurale della Prospettiva dei Sistemi in cui i fenomeni sono mappati, diagrammati e disegnati, piuttosto che misurati.

La tesi è che nessuno di questi quattro punti di vista è sufficiente da solo per comprendere l'esperienza architettonica e che i fenomeni svelati dai metodi dei quattro punti di vista stanno emergendo contemporaneamente: considerati nell'insieme i quattro approcci forniscono una comprensione più sofisticata e trascendente, necessaria per comprendere l'esperienza architettonica; l'uno non può essere sostituito dall'altro poiché le tecniche utilizzate in un determinato contesto sono appropriate per descrivere solo quell'ambito specifico (DeKay and Brager, 2023).

Alla luce di queste intuizioni è quindi possibile definire un metodo per la comprensione integrale e trasformativa dell'esperienza che può costituire la base per gli schemi di progettazione esperienziale modulare, attraverso il seguente approccio²: le organizzazioni spaziali (LR) modellano le dinamiche ambientali (UR), come le forze naturali, generando nuove distribuzioni di condizioni (UR) e creando ambienti per campi esperienziali (UL), in cui gli individui possono avere esperienza in prima persona esperienze (UL) dando loro significato attraverso i loro background interpretativi (LL) che operano da una o più visioni del mondo più ampie determinate collettivamente (LL).

Le organizzazioni spaziali e le dinamiche delle forze naturali sono interconnesse in modo tale che le condizioni ambientali e la composizione spaziale si influenzano a vicenda, pensando all'Architettura-Natura come un'unità, anche negli interni. I comportamenti degli occupanti modificano le condizioni naturali dinamiche e viceversa mentre gli abitanti sono inter-attori nella definizione del proprio campo di possibilità; queste distribuzioni dinamiche delle condizioni nello spazio generano campi di possibilità in cui alcune esperienze sono più probabili di altre: controllare queste condizioni nello spazio è il lavoro di progettazione per l'esperienza (Fig. 6). Parallelamente non bisogna trascurare il significato culturale che, intervenendo come sfondo interpretativo conscio o tacito, vincola le possibili esperienze per un individuo all'interno del campo e contemporaneamente da origine al significato delle esperienze conosciute; i vari linguaggi architettonici rafforzano i background interpretativi contribuendo a un co-emergere di esperienze architettoniche, incontri con la natura e significati.

Queste prospettive inter-influenzanti formano una premessa necessaria per comprendere la struttura integrale sviluppata dagli schemi e per apprezzare l'orizzonte teorico di Experiential Design Schemas, un volume che ha l'ambizione di avviare l'esplorazione nel vasto campo dell'esperienza architettonica integrata con l'altrettanto ampia sfera di sistemi e mezzi, forme e spazi che compongono l'architettura, a partire da un quadro concettuale aperto e da alcuni strumenti pratici utili per una nuova ed evolutiva connessione tra architettura, utenti e natura.

Modularità della mente e pratiche didattiche contemporanee | Analogamente alla geometria frattale l'organizzazione della mappa dei concetti modulari si basa sull'idea che ogni schema è sia

Sensation Environmental stimuli affect sensory organs		Affect Feelings + thoughts about a sensation		Understanding Knowledge of abiotic, biotic + ecologic		Affiliation Significant relationships	
hot	cold	safe	playful	aware	comprehension	empathy	merging
bright	dark	private	curious	knowing	appreciation	bonding	kinship
quiet	loud	exposed	imaginative	orderly	wholeness	companionship	affinity
smooth	rough	protected	inspired	meaningful	integrity	membership	unity
wet	dry	excited	fascinated	enrichment	coherence	genus loci	compassion
humid	arid	surprised	attracted	discernment	significance	community	rapport
calm	busy	satisfied	confident	literacy	utility	belonging	solidarity
still	breezy	comfortable	healthy	recognition	tolerance	connection	identity
odourless	fragrant	pleased	bored	familiarity		oneness	acquaintance
enclosed	open	delighted	sleepily			alliance	intimacy
hard	soft	joyful	alive				
		wonderful	awestruck				

Fig. 2 | Complexity of experiential states: the more inclusive states seem to depend on the less inclusive ones (source: DeKay and Brager, 2023).

un tutto che una parte, mentre la struttura della mappa si basa su osservazioni relative alle relazioni tra parti e intero, identificate formalmente per la prima volta nella teoria generale dei sistemi (von Bertalanffy, 1968) e successivamente nella teoria della gerarchia ecologica (Salthe, 1985). Alcuni aspetti del concetto di modularità, teorizzato per primo nel campo dell'informatica (Parnas, 1972), hanno costituito la base per il tema della modularità in ambito educativo: coesione interna, disaccoppiamento, facilità di modifica e replicabilità sono infatti caratteristiche del 'modulo informatico' che ben si applicano anche al contesto educativo, tanto che il tema della modularità è da lungo tempo anche al centro del dibattito nelle scienze cognitive³. Una delle premesse su cui si fonda Experiential Design Schemas riguarda il cervello come un sistema integrato, organizzato in moduli differenziati ma in grado di attivare varie aree cognitive per una esperienza completa: i nostri cervelli sono infatti organizzati in sistemi molteplici, in reti, in circuiti neurali, sostanzialmente in moduli con un funzionamento relativamente indipendente l'uno dall'altro, che elaborano le informazioni in parallelo (García García, 2005).

In questo senso il volume stesso è costruito come un sistema di moduli integrati, denso di aspetti tipici della manualistica (di Zevi, Ridolfi e Neufert) e di riferimenti progettuali in grado di trasmettere, per quanto possibile, una idea di spazio correlata a una sensibilità verso la natura. La modularità è quindi declinata per replicare non solo gli elementi costruttivi, ma interi sistemi spaziali composti e le relative sensazioni suscitate in chi li esperisce. Mentre un'ampia letteratura indaga gli effetti neurologici delle diverse spazialità riferite ad ambienti sia interni⁴ (Pasqualini, Llobera, and Blanke, 2013) che naturali (Folmer, Haartsen and Huigen, 2019), Experiential Design Schemas si inserisce nel panorama dei 'manuali' operativi di architettura con un'ampia tassonomia di sistemi compositivi utili sia allo studente che al professionista.

Tornando al concetto di modulo possiamo facilmente riconoscere una marcata intenzionalità didattica nell'idea di catalogazione e quindi di replicabilità che, anche se non menzionata nel libro, rimanda al lavoro di Rem Koolhaas (2018) sugli elementi dell'architettura. Il lavoro dell'architetto olandese si concentra sui piccoli tasselli di un mosaico architettonico ricco e complesso: denomi-

nati 'elementi', le finestre, la facciata, il balcone e il corridoio, il caminetto, le gradinate, le scale mobili e l'ascensore sono interpretati come elementi narrativi insiti nei dettagli strutturali, privi però di tutta la complessità degli effetti sulla percezione umana delle scelte progettuali. L'intreccio koolhaasiano di tradizioni, contaminazioni, similitudini e differenze è letto in relazione all'evoluzione dell'architettura secondo i progressi tecnologici, cambiamenti climatici, ragioni politiche, contesti economici, requisiti normativi, rispetto ai quali Experiential Design Schemas si propone come uno studio complementare (Fig. 7).

Un esempio esplicativo della metodologia utilizzata è fornito dalla schedatura della William Winslow House a River Forest (Illinois) di Frank Lloyd Wright in cui l'analisi compositiva di una particolare parte della casa è inserita nella condizione sensoriale 'contrasto' e nello schema progettuale 'thermal enclave' (Fig. 8). La condizione spaziale descritta riguarda un sottospazio con condizioni e atmosfera in contrasto con lo spazio ambientale più ampio, un'enclave termica intesa come una zona con criteri termici diversi che danno luogo a uno spazio non uniforme (Figg. 9, 10).

Nella Winslow House Wright colloca il caminetto ai margini del salone di rappresentanza, di fronte alla porta d'ingresso, in un'alcova leggermente stretta e incassata; il soffitto ribassato, un'alzata di tre gradini, la presenza di panche imbottite e il mattone impiegato su tre lati sono elementi che si combinano per amplificare il calore sociale, fisico e psicologico (DeKay and Brager, 2023). La scheda è completata da una serie di indicazioni progettuali che sviluppano il tema offrendo variazioni formali utili al raggiungimento di un obiettivo come 'organizzare aree più calde in ambienti freddi' o 'inserire dispositivi di scambio' utili a chiudere o aprire l'enclave per un maggiore ricambio d'aria.

Conclusioni | Alla luce dell'impostazione espressa dalla teoria integrale e applicata all'architettura da Experiential Design Schemas l'odierna tendenza tecnicista e performativa dell'architettura appare ancora più riduttiva e parziale. Prospettive più inclusive e olistiche, come quelle avanzate dai più recenti lavori di Christopher Alexander o con modalità manualistiche e tassonomiche di Rem Koolhaas, hanno indagato poco l'architettura come di-

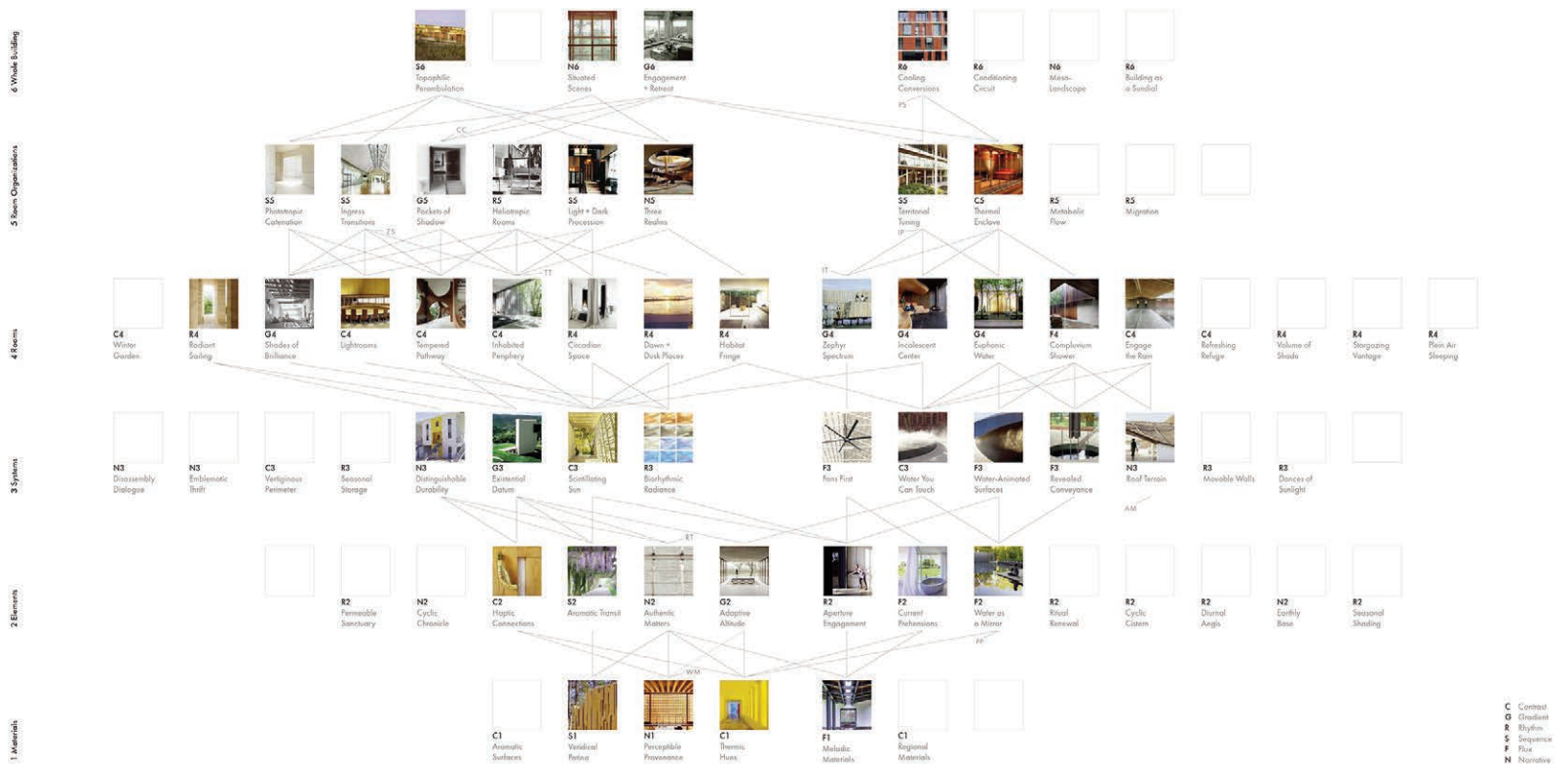


Fig. 3 | The pattern language map is a way to observe the structure of the knowledge base for experiential design; it shows the potential relationships in the numerous design patterns and organises them in a nested, lattice-like hierarchical network (source: DeKay and Brager, 2023).

positivo in grado di qualificare il rapporto tra uomo e natura. Lo scopo di Experiential Design Schemas è proprio trovare una chiave ‘generativa’ dell’architettura, ovvero una modalità analitica e allo stesso tempo operativa – senza costruire una teoria chiusa in se stessa – per proporsi come un sistema modulare che, a supporto delle varie discipline e per diverse scale di intervento, contribuisca a una maggiore qualità dell’esperienza spaziale nel rapporto tra architettura e natura. In questo senso il testo interpreta l’architettura come un dispositivo sensoriale, posto in una condizione privilegiata nella relazione tra uomo e natura, un’opera aperta, consapevole delle infinite e meno note variazioni dell’esperienza umana e della capacità della scienza odierna di misurarne gli effetti sul benessere dell’individuo (Fig. 11).

Un passo in avanti quindi rispetto ai limiti delle teorie fenomenologiche formulate da Juhani Pallasmaa e Steven Holl in termini sia scientifici, di misurabilità degli effetti di un’esperienza corporea, sia pedagogici, come manuale di progettazione avanzato e aggiornato. La modularità degli schemi progettuali e delle condizioni sensoriali individuate consente infatti l’applicabilità dei concetti a varie scale, nonché un certo grado di aggiornamento in base alle innovazioni ancora non prevedibili. Non a caso la mappa del linguaggio degli schemi lascia dei riquadri vuoti, con un senso di incompletezza e di evoluzione tipico dell’opera aperta: gli schemi conferiscono al progettista il potere di far emergere nuove possibilità da modelli precedentemente non identificati, trasformando così il percepito in conosciuto. Gli schemi forniscono un accesso concettuale in una forma tale che il qualitativo possa essere conosciuto più profondamente e quindi incorporato in un processo di progettazione. Il modo in cui un linguaggio esperienziale degli schemi si intreccia e si coor-

dina con altri linguaggi provenienti da prospettive alternative consente appunto l’applicazione del metodo anche ad altre discipline del progetto. Si pensi al progetto di paesaggio in cui confluiscono, nel rapporto dell’uomo con la natura, temi di carattere culturale, sociale, tecnologico ed estetico. In questa direzione appare possibile applicare il sistema degli schemi per la progettazione esperienziale anche alla scala paesaggistica, anch’essa totalmente descrivibile dalle diverse prospettive della teoria integrale. In Experiential Design Schemas tale opzione è letta però solo nella dimensione relazionale tra edificio e intorno, limitata al tema della soglia, dell’interazione tra sequenze, anche di spazi aperti, e del rapporto tra aperture e punti di vista sul paesaggio naturale. Tuttavia tale limite va letto nell’idea non duale della natura, ovvero che inizia o termina con la soglia di ingresso in un edificio, quanto in una intenzione trasformativa della soglia stessa, intendendo gli edifici piuttosto come habitat degli ‘ecosistemi umani partecipativi’ in cui la Natura si compenetra in quanto forza biotica.

In recent decades, scientific research in the neurological field has emphasised the importance of multimodal perception, i.e. the effects on the perception of events and objects in the world that are observed when there is information from more than one sensory modality. Most of this research indicates that, at some point in perceptual processing, information from the various sensory modalities is integrated by the person having the experience (Bertelson and de Gelder, 2012; Martín et alii, 2015): in other words, humans combine and process information as a unified representation of the world.

Architecture, considered in this text as a built space, physically visible and experienced by its inhabitants, is manifested in perception itself. The experience of space is constituted as a fusion of influences: spaces, materials, light, sound, scent, heat, etc., along with the felt sensations generated, leading to a fundamental knowledge of architecture. Steven Holl (2004), in one of his best-known texts, *Parallax – Architecture and Perception*, writes that in crossing a space, a fusion takes place between the subjective, the sensations caused by crossing the place, and the objective, that is, the morphology and volumetry of the space itself. For Holl, the design logic behind any architecture must be closely linked to the final perception that one wants to engender in architectural space. The designer must imagine walking through the space as it will be built and ‘anticipate’ the sensations and emotions that the space will trigger in its occupants.

Space, colour, light, geometry, detail and materials are a continuous experiment, and once chosen and realised, they become one, inseparable in the final condition and can collectively provoke a particular architectural perception. This aspect of architectural research, more phenomenological than technical, more plastic and formal than typological, has been investigated more by working architects with little inclination to pure theory, such as Alvaro Siza, Fernando Tavora, Steven Holl, Jaques Herzog, Kazuyo Sejima, Tatiana Bilbao and Junya Ishigami, to name but a few, leading some critics to delegitimise as unscientific design theory originating from innate ability, talent, or poetic production.

Juhani Pallasmaa (2005; Pallasmaa et alii, 2013), in *The Eyes of the Skin and in Architecture and Neuroscience*, has pursued creative scholarship on the capacity of space to be emotional,

pervasive and multisensory, offering valuable theoretical support to those who design architecture from a more experiential and human-centred inclination. His contribution is, on a theoretical level, somewhat opposite to that of the scholars of typology, pattern, and module as the basic unit for creating architecture. Christopher Alexander, the most important exponent of this strand, developed his architectural language of patterns and structures in which the goal was to describe how an infinite number of 'phrases' or buildings can be produced from a finite number of elements (patterns), which express the relationship among space and events (Alexander et alii, 1977).

For Alexander, a 'pattern language' not only has the power to generate spatial arrangements but is also 'generative like natural languages'. In the early 60s, Alexander discussed with students the decomposition of a complex problem into individual problems and justified that the overall problem was solved by solving individual problems. The process theorised by Alexander is, in fact, evolutionary and incremental and reached a more complete and organic dimension from the 1980s with the book *A New Theory of Urban Design* (Alexander et alii, 1988) and later in *The Nature of Order* (Alexander, 2001). The didactic and methodological propensity of Alexander's social-spatial theory and the more first-person, less replicable or generalisable approach of the phenomenologists seem to be two opposite worlds.

More recently, researchers working from the phenomenological perspective, such as Ila Bêka and Louise Lemoine (2023), have preferred to employ audio-visual communication means, even if the process examines the filmic product itself rather than the architecture. On the other hand, typological studies, centred on aggregable spatial schemes and modules, have mainly intersected technology with building science (Wallance, 2021; Hogan-O'Neill, 2021) or engaged evolutions of planimetric schemes (Lechner, 2021; Bielefeld, 2016) leaving a feeling of theoretical overweighting, despite pedagogical intentions.

Within this 'gap' between the two approaches spans *Experiential Design Schemas* (DeKay and Brager, 2023; Fig. 1), a theoretical and practical work that investigates design guidance for generating emotional experience (the phenomenological) yet structured as a highly rational matrix or catalogue of modular design schemes (the typological). The work focuses on how designers can orchestrate different experiences of dynamic environmental conditions to connect inhabitants to the rhythms of nature, and to do so, they rely on a complex structure of diagrams, schemes and modules that analyse buildings and their parts in relation to the spatial, emotional and sensory effects they produce (Fig. 2). The text elaborates different perspectives, from the phenomenology of architecture to the theoretical disciplines, drawing on building science, engineering and health sciences, translating them into practical language useful for design.

Fig. 4 | Environment, senses + perception: environmental data are processed by the sensory organs that send impulses to the brain, which interprets the information. Sensation is a physical process, and perception is psychological (source: DeKay and Brager, 2023).

The work is about how designers can interpret and understand people's subjective experience in order to translate it into concrete solutions at various scales (Fig. 3). Architectural experiences – which are analysed within the theoretical framework of Integral Design as individually experienced phenomena, neurobiological function, meaning located in particular places and an evolving archetype – are based on research that continues applied studies of Integral Design theory as *Integral Sustainable Design: Transformative Perspectives* (DeKay, 2011) and *Sun, Wind & Light – Architectural Design Strategies* (DeKay and Brown, 2014).

The collaboration with Gail Brager, an environmental engineer with important studies on the performance of green buildings, and perhaps best known for co-research on the transformation of conventional comfort into adaptive comfort (de Dear and Brager, 2001), has produced a complex result, not easily accessible at first reading, that works on the replicability of 'experiential modules' they call schemas by explicating in an innovative way how building systems, technologies and combinations of systems produce positive sensations, able to go beyond simple neutral and comfort states to enter the emotional field and transcend to higher experiential states (Fig. 4).

An Integral Design approach to architectural experience | In trying to understand the nature of architectural experience and Nature connections in buildings, the authors were faced with, on one hand, a lack of clear and specific language, concepts and terminology (at least in English) and, on the other, a wide variety of partial explanations from seemingly irreconcilable perspectives of diverse scholars and practitioners in neuroscience, typology, phenomenology and cultural theory.

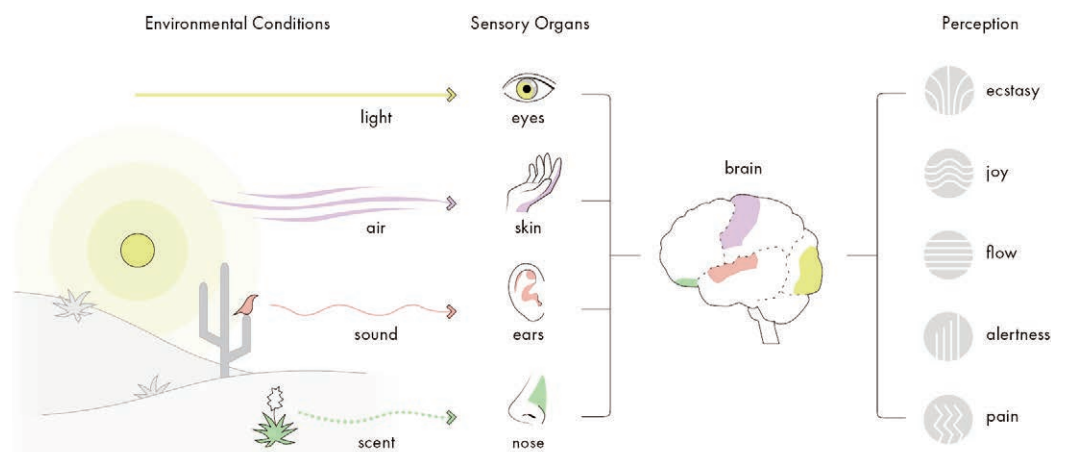
Upon deeper investigation, DeKay and Brager (2023) found that the variety of ideas about experience from the arts, sciences and humanities could be mapped using the four fundamental perspectives introduced by philosopher Ken Wilber (2007); at its most essential level, his *Integral Theory* organises the perspectives that can be taken on each problem into a matrix, visualised in a quadratic diagram. In addition to the fundamental perspectives (quadrants), Wilber's AQAL (All Quadrants, All Levels; Fig. 5) model also includes the dimensions of levels of complexity in each quadrant, lines of development, states and types. He describes it as a 'meta-theory' and proposes it as one

of the most comprehensive approaches to reality, which seeks to explain how all forms of knowledge and experience can be coherently integrated.

Wilber (2007) starts with the premise that each mind, each theory, is partially yet never fully correct. None can represent the full wholeness of any occurrence, such as a building¹. In considering architectural experience from both subjective and objective perspectives as valid, and from both their individual and collective expressions as ever-present, one finds these four prospects: 1) the *Experiential Perspective* of the individual self, consciousness, feelings and thoughts; 2) the *Behaviours Perspective* that employs science and engineering to observe and measure the correlates of felt experience in the empirical world; 3) the *Cultural Perspective* that situates individual experience within worldviews, narratives and symbolic meanings; and 4) the *Systems Perspective* that maps complex flows, hierarchies and space in social, natural and urban ecologies and contexts. Seemingly complex, this structure is instead very useful in drawing attention to the opportunities and limits of individual perspectives, which reveal and obscure aspects of the whole by their diverse methods. For example, one can 'read' a building by analysing its energy performance (Behaviours), evaluating it positively when efficient, or studying its embedded narrative communication in the urban context (Cultures), evaluating it negatively for its discord.

Using this approach, examples of the major viewpoints on architectural experience could then be parsed (DeKay and Brager, 2023):

- 1) *Experiences* – Juhani Pallasmaa and the phenomenologists (Merleau-Ponty, 2003) take a first-person, subjective perspective, appreciating the experience as it occurs to the individual in consciousness; this exemplifies the 'I-realm' of the Experiences Perspective in which to be known an inhabitant has to report on their own feeling;
- 2) *Behaviors* – Harry F. Mallgrave (2015), Antonio Damasio (2010, 2018) and the architectural neuroscientists take a third-person, objective perspective that seeks explanations for experience in their biological, evolutionarily-developed origins; this can be considered an 'IT-realm' where the fundamentals of biology and physics rule the Behaviours Perspective, named so because behaviours of people and things in the empirical world can be observed, measured and weighed;
- 3) *Cultures* – Lance LaVine (2001), a rare constructive example of theorists taking a second-person

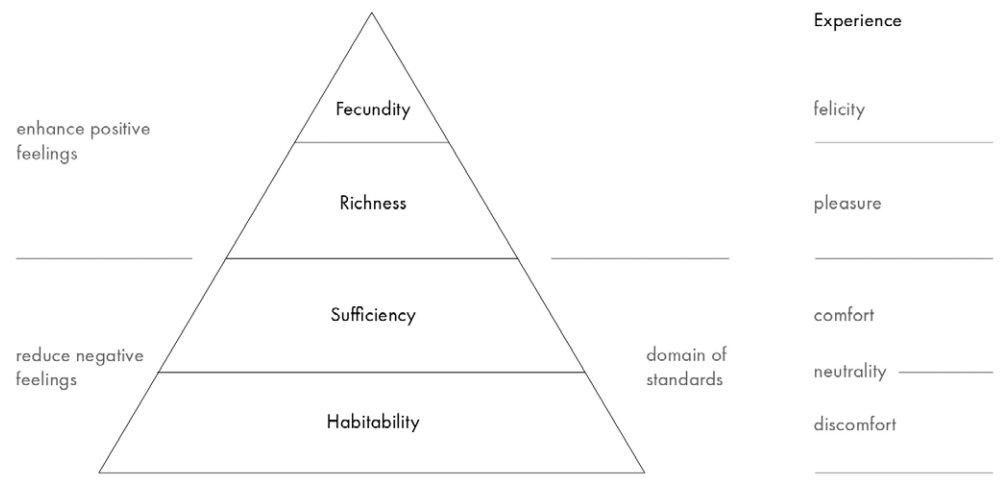
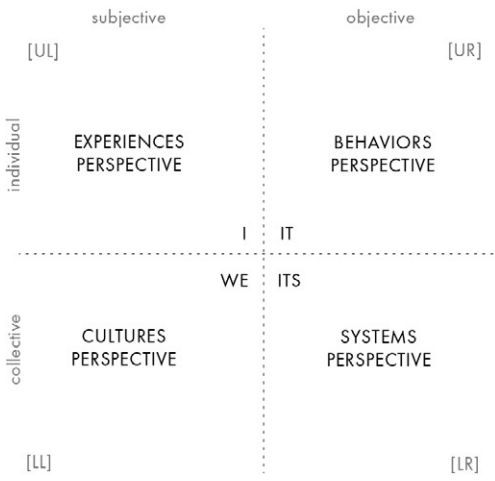


plural, intersubjective Cultural Perspective, finds experience as intertwined with meanings associated with place-empathetic architecture that arises from the particulars of a culture situated in a material and climatic place; this approach occupies the 'WE-terrain' in which meaning and belonging arise inside the conversations of cultural communities of which individuals are members; 4) Systems – Grant Hildebrand (1991), Thomas Thiis-Evensen (1987), and the typologists take a more formalist approach approximating a third-person, inter-objective perspective where the physical patterning and organisation of universal architectural archetypes are the drivers of human experience. This kind of systemic, multi-scalar

thinking defines a complex, plural 'ITS-terrain' of the Systems Perspective in which phenomena are mapped, diagrammed and drawn, rather than measured.

The proposition is that none of these four alone is sufficient to understand architectural experience, and that the phenomena disclosed by the methods of the four views are co-arising. Taken integrally, they provide a more sophisticated and transcending understanding. Each of these four fundamental perspectives is necessary to understand architectural experience. None can be reduced to any of the others. The data revealed from each perspective's methods are valid in the approach's own domain (DeKay and Brager, 2023).

Given these insights, it then became possible to frame what, for the authors, was a transformative integral understanding of experience that was to become the basis underlying the modular experiential design schemas developed. The approach² was summarised like this: spatial organisations (LR) shape the environmental dynamics (UR), such as natural forces, generating new distributions of conditions (UL), in which individuals can (without compulsion) have first-person experiences (UL) and give them meaning through their interpretive backgrounds (LL) that operate from one or more larger collectively-determined world-views (LL). Spatial organisations and natural force dynamics are interlinked



Experiential Design Schemas

Contrast	Gradient	Rhythm	Flux	Sequence	Narrative
C1 Thermic Hues	G1	R1	F1 Melodic Materials	S1 Veridical Patina	N1 Perceptible Provenance
C2 Haptic Connection	G2 Adaptive Altitude	R2 Aperture Engagement	F2 Current Prehension	S2 Aromatic Transit	N2 Authentic Matters
C3 Scintillating Sun	G3 Existential Datum	R3 Biorhythmic Radiance	F2 Water as a Mirror	S3	N3 Roof Terrain
C3 Water You Can Touch	G4 Incalescent Center	R4 Dawn + Dusk Places	F3 Fans First	S4	N3 Distinguishable Durability
C4 Engage the Rain	G4 Euphonic Water	R4 Circadian Space	F3 Revealed Conveyance	S5 Territorial Tuning	N4
C4 Inhabited Periphery	G4 Zephyr Spectrum	R4 Radiant Sailing	F3 Water-Animated Surfaces	S5 Ingress Transitions	N5 Three Realms
C4 Lightrooms	G4 Shades of Brilliance	R4 Habitat Fringe	F4 Compluvium Shower	S5 Light + Dark Procession	N6 Situated Scenes
C4 Tempered Pathway	G5 Pockets of Shadow	R5 Heliotropic Rooms	F5	S5 Phototropic Catenation	
C5 Thermal Enclave	G6 Engagement + Retreat	R6 Cooling Conversions	F6	S6 Topophilic Perambulation	
C6					

C Contrast
G Gradient
R Rhythm
F Flux
S Sequence
N Narrative

Fig. 5 | The four quadrants of integral theory: two essential universal distinctions frame four fundamental perspectives on any given event; each employs different methods and represents the basic approaches to knowledge that human beings have developed (source: DeKay, 2011).

Fig. 6 | Spectrum of space occupation experiences: building standards begin with habitability; conventional practices aim for sufficiency; good designers aim to go beyond comfort (source: DeKay and Brager, 2023).

Fig. 7 | Distribution of conditions: a framework for organising thinking about the architectural experience (source: DeKay and Brager, 2023).

such that environmental conditions and spatial composition influence each other; one can think of Architecture-Nature as a unity, even indoors. Occupant behaviours modify dynamic natural conditions and vice-versa. Inhabitants are inter-actors in setting their own field of possibilities. These dynamic distributions of conditions in space generate fields of possibilities in which some experiences are more probable than others. Controlling these conditions in space is the work of designing for experience (Fig. 6). Yet, cultural meaning is an ever-present context as conscious or tacit backgrounds of interpretation that constrain the possible experiences for an individual within the field and simultaneously give rise to the meaning of the known experiences. Various architectural form languages reinforce and express the interpretive backgrounds, thereby contributing to a co-arising of architectural experience, Nature encounters and meaning.

These inter-influencing perspectives form a premise necessary to understand the embedded integral structure of the schemas and to appreciate the extended theoretical horizon found in Experiential Design Schemas, a book that has the ambition of initiating exploration of the vast terrain of architectural experience as integrated with the equally vast sphere of systems and means, forms and spaces that makeup architecture, hopefully providing the start of an open-ended conceptual framework and some practical tools useful for a new and evolving connection among architecture, inhabitants and Nature.

Modularity of mind and contemporary teaching practices | Analogous to fractal geometry, the organisation of the map of modular design schemas is based on the idea that each schema is both a whole and a part. The structure of the schemata language map is based on observations concerning the relationships among parts and wholes, first formally identified in general systems theory (von Bertalanffy, 1968) and later in ecological hierarchy theory (Salthe, 1985). Certain aspects of the concept of modularity, which first emerged in the field of computer science (Parnas, 1972), formed the basis for the theme of modularity in education: internal cohesion, decoupling, ease of modification, and replicability are in fact characteristics of the 'computer module' that also apply well to the educational context. The subject of modularity has also long been at the centre of debate in cognitive science³. One of the premises

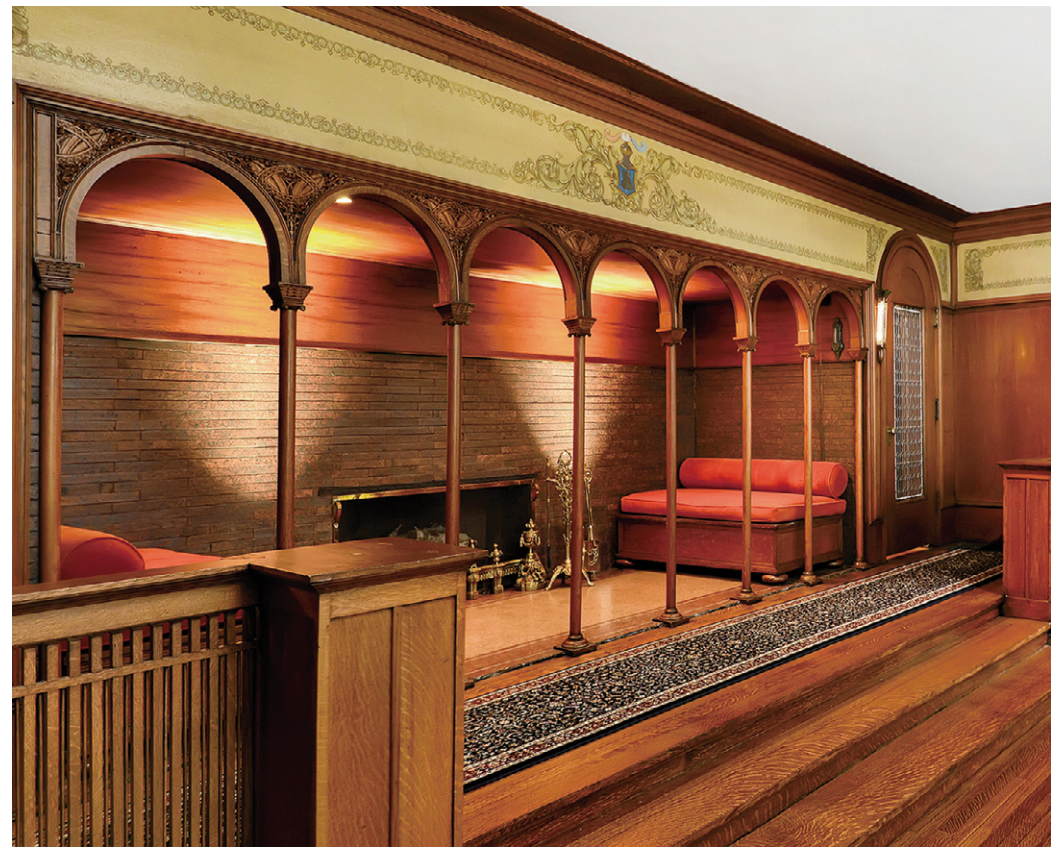
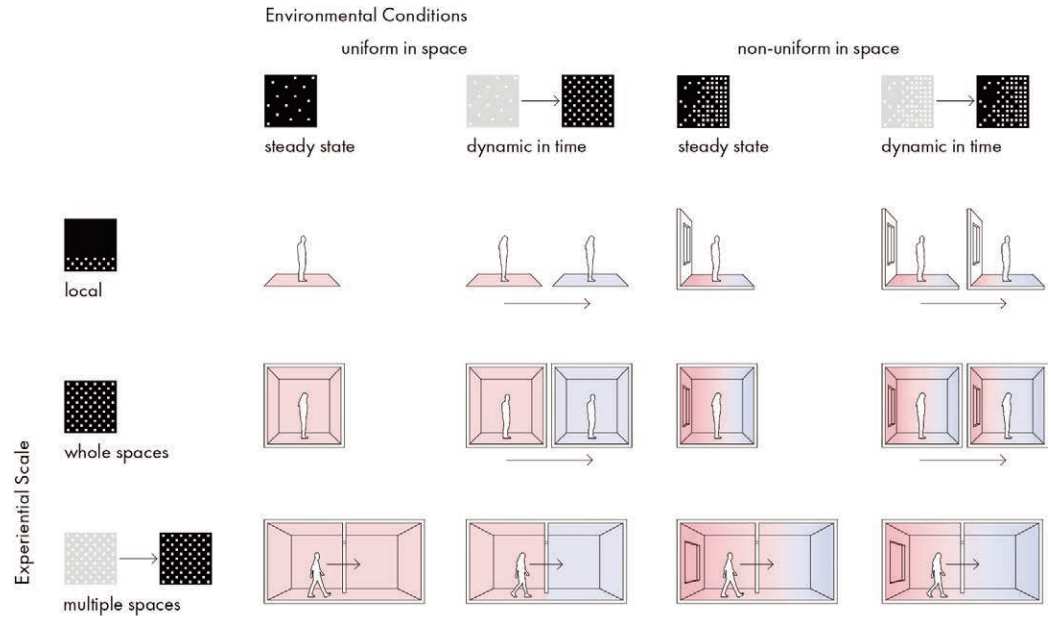
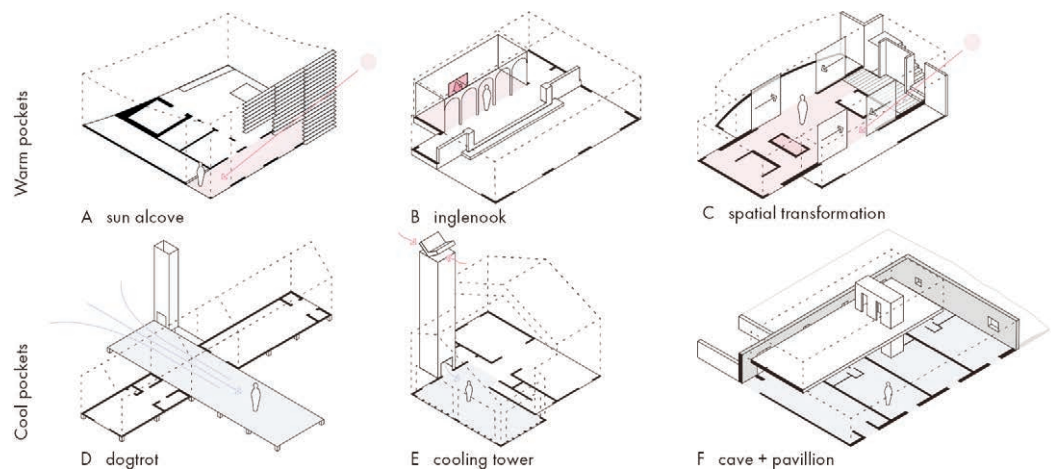


Fig. 8 | Overview of environmental conditions in and around buildings (source: DeKay and Brager, 2023).

Fig. 9 | William Winslow House (1893) in River Forest (Illinois), designed by F. L. Wright; cool climate: an extra-warm welcome for the visitor at the end of a cold journey (credit: J. Tschetter, IC360 Images).

Fig. 10 | Organisation of cold and warm enclaves: (a) Rocky Mountain Institute's Innovation Center (2015) in Basalt (Colorado), designed by ZGF; (b) Winslow House (1893) in River Forest (Illinois), designed by F. L. Wright; (c) Cloud House (2012) near Otis (Oregon), designed by G. Z. Brown; (d) Zachary House (2005) in Zachary (Louisiana), designed by Atkinson Architecture; (e) Carnegie Institute for Global Eco (2004) in Stanford (California), designed by EHDD; (f) Olnick Spanu House Garrison (2008) in New York, designed by A. C. Baeza (source: DeKay and Brager, 2023).



More Known	Less Known
Avoiding discomfort Neutral + comfort conditions Single senses	Creating positive experiences Delight + beyond-comfort states Multiple senses interacting
Single room Simple spaces	Sequences of rooms Complex spatial order
Momentary experience	Manifold time scale experiences
Conditions steady-state Conditions indoors Conditions uniform in space Conditions passively received	Conditions dynamic in time Conditions in-between indoors + out Conditions non-uniform in space Conditions actively engaged or controlled
Conditioning by air delivery Comfort produced mechanically	Conditioning by radiant delivery Comfort produced passively or hybridly
Nature outside	Nature inside

Fig. 11 | State of the experiential scientific evidence: less studied topics offer frontiers and challenges for the development of better methods of investigation (source: DeKay and Brager, 2023).

underlying Experiential Design Schemas concerns the brain as an integrated system, organised in differentiated roles but capable of activating various cognitive areas for a complete experience. Our brains are organised in multiple systems, in networks, in neuronal circuits, essentially in modules, which function relatively independently (of each other) and process information in parallel (García García, 2005).

In this sense, the book itself is constructed as a system of modules integrated with each other, dense with aspects typical of manuals (by Zevi, Ridolfi and Neufert) and design references capable of conveying, as far as possible, a spatial sensation related to a sensitivity towards nature. Modularity is thus transcended yet included in the possibility, intuited and analysed by the authors, of replicating not only construction elements but entire composed spatial systems and the relative sensations provoked in those who see or experience them. While a wide literature investigates the neurologic effects of different spatial situations, both of interior spaces⁴ (Pasqualini, Llobera, and Blanke, 2013) and natural environments (Folmer, Haartsen and Huigen, 2019), Experiential Design Schemas has the merit of entering the panorama of operative ‘manuals’ of architecture with a wide taxonomy of compositional systems useful to both the student and the professional.

Returning to concepts born with computer science, we can easily recognise in the book the marked didactic intentionality of the idea of cataloguing and thus replicability which, though not mentioned in the book, can be interpreted as referring to Rem Koolhaas’s (2018) architectural elements concept. The Dutch architect’s work focuses on the small pieces of a rich and complex architectural mosaic. Dubbed ‘elements’, the windows, the façade, the balcony and corridor, the fireplace, the staircase and escalator, and the lift are interpreted as narrative elements embedded in structural details, yet devoid of the full complex-

ity of the effects on human perception of design choices. The Koolhaasian interweaving of traditions, contaminations, similarities and differences reads the evolution of architecture according to technological advances, climatic changes, political reasons, economic contexts and regulatory requirements. Experiential Design Schemas can be understood as a complementary work (Fig. 7).

An example illustrative of the methodology used is the reading of Frank Lloyd Wright’s William Winslow House in River Forest, Illinois. Placed in the sensory condition ‘contrast’ and the design schema ‘thermal enclave’, a particular area of the house is explained (Fig. 8). The spatial condition described concerns a subspace with conditions and atmosphere contrasting with the larger environmental space, a thermal enclave resulting in thermal conditions that are non-uniform space (Figg. 9, 10).

Into Winslow House, Wright places the framed fireplace at the edge of the reception hall, opposite the front door, in a slightly narrow, recessed alcove. With a lowered ceiling and a three-step riser, the fireplace is flanked by upholstered benches. The brick provides warmth and is arranged on three sides. These elements combine to amplify social, physical and psychological warmth (DeKay and Brager, 2023). The schema is completed with a series of design indications that develop the theme by offering formal variations useful for achieving a goal, such as ‘organising warmer areas in cold environments’ or ‘inserting exchange devices’ useful for closing or opening the enclave for greater air exchange.

Conclusions | In light of the approach expressed by integral theory and applied to architecture by Experiential Design Schemas, today’s technician and performative tendency of architecture appears even more reductive and partial. More inclusive and holistic perspectives, such as those advanced by Christopher Alexander’s most re-

cent work or in the manualistic and taxonomic manner of Rem Koolhaas, have scarcely investigated architecture as a device capable of qualifying the relationship between man and nature. The aim of Experiential Design Schemas is precisely to find a ‘generative’ key to architecture, that is, an analytical and at the same time operative modality – without constructing a theory closed in on itself – to propose itself as a modular system that, in support of the various disciplines and for different scales of intervention, contributes to a greater quality of spatial experience in the relationship between architecture and nature. In this sense, the text interprets architecture as a sensorial device, placed in a privileged condition in the relationship between humans and nature, an open work, aware of the infinite and lesser-known variations of the human experience and of the capacity and limits of today’s science to measure its effects on the wellbeing of the individual (Fig. 11).

The book is a step forward, therefore, from the limits of the phenomenological theories formulated by Juhani Pallasmaa and Steven Holl in terms of both science, the measurability of the effects of a bodily experience, and pedagogy, as an advanced and up-to-date design manual. In fact, the modularity of the design schemes and sensory conditions identified allows for the applicability of the concepts at various scales, as well as a certain degree of updating according to innovations that cannot yet be foreseen. It is no coincidence that the schematic language map leaves empty boxes, with a sense of incompleteness and evolution typical of the open work: schematics give the designer the power to make new possibilities emerge from previously unidentified patterns, thus transforming the perceived into known. Patterns provide conceptual access in such a form that the qualitative can be known more deeply and thus incorporated into a design process.

The way in which an experiential language of schematics interweaves and coordinates with other languages from alternative perspectives allows precisely the method to be applied to other design disciplines as well. One thinks of landscape design in which cultural, social, technological and aesthetic themes converge in man’s relationship with nature. In this direction, it appears possible to apply the system of experiential design schemas also to the landscape scale, which can also be fully described from the different perspectives of integral theory. In Experiential Design Schemas, this option is read, however, only in the relational dimension between building and surroundings, limited to the theme of the threshold, the interaction between sequences, even of open spaces, and the relationship between openings and viewpoints on the natural landscape. However, this limitation is to be read in the non-dual idea of nature, i.e. that Nature does not begin or end with the threshold of entry into a building, as much as in a transformed understanding of the threshold itself, knowing buildings rather as habitats of ‘participatory human ecosystems’ in which Nature interpenetrates as a biotic force.

Acknowledgements

The contribution is the result of an interview with Prof. M. DeKay and G. Brager on 5 July 2023. However, the introductory paragraph, ‘Modularity of mind and contemporary teaching practices’ and ‘Conclusions’ are to be attributed to S. Tornieri, while the paragraph ‘An Integral Design approach to architectural experience’ is to be attributed to M. DeKay.

Notes

1) It is helpful to mention the thought of T. Morton, who, although not directly related to architecture, has undoubtedly influenced the idea of spatial relationships among objects. With his definition of hyper-object, it is possible to read phenomena and elements without a scalar definition because every tangible existence is intrinsically linked to something else intangible.

2) To navigate the quadratic system of perspectives, one uses UL (Upper Left), UR (Upper Right), LL (Low Left), and LR (Low Right).

3) On the one hand, cognitivists believe that the mind is composed of a collection of modules specialised in different cognitive abilities and areas of activity. These modules would be innate, i.e. encoded in the genome and thus present at birth, and it would only remain to be understood what and how many these modules are and how they are made (Fodor, 1983). Oppositely, empiricists emphasise the role of the developmental process in shaping the mind, avoiding the idea of innate abilities of the mind (Scerif and Karmiloff-Smith, 2001).

4) The work of the Academy of Neuroscience for Architecture (ANFA), one of the world’s leading organisations involved in the study of neuro-architecture, which aims to promote the study of the relationship between buildings and the human body, is useful in this regard.

References

- Alexander, C. (2001), *The Nature of Order – An Essay on the Art of Building and the Nature of the Universe*, Oxford University Press, Oxford.
- Alexander, C., Ishikawa, S., Silverstein, M., Jacobson, M., Fiksdahl-King, I. and Shlomo, A. (1977), *A pattern language – Towns, buildings, construction*, Oxford University Press, New York. [Online] Available at: arl.human.cornell.edu/linked%20docs/Alexander_A_Pattern_Language.pdf [Accessed 27 October 2023].
- Alexander, C., Neis, H., Anninou, A. and King, I. (1988), *A New Theory of Urban Design*, Oxford University Press, Oxford. [Online] Available at: global.oup.com/academic/product/a-new-theory-of-urban-design-9780195037531?cc=se&lang=en& [Accessed 31 October 2023].
- Béka, I. and Lemoine, L. (2023), *The emotional power of the space*, Béka & Partners, Paris.
- Bertelson, P. and de Gelder, B. (2004), “The Psychology of Multimodal Perception”, in Spence, C. and Driver, J. (eds), *Crossmodal Space and Crossmodal Attention*, Oxford Academic, pp. 141-177. [Online] Available at: doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198524861.003.0007 [Accessed 27 October 2023].
- Bielefeld, B. (ed.) (2016), *Planning Architecture – Dimensions and Typologies*, Birkhäuser, Basel.
- Damasio, A. (2018), *The Strange Order of Things – Life, Feeling and the Making of Cultures*, Pantheon, New York.
- Damasio, A. (2010), *Self Comes to Mind – Constructing the Conscious Brain*, Pantheon, New York.
- de Dear, R. and Schiller Brager, G. (2001), “The Adaptive Model of Thermal Comfort and Energy Conservation in the Built Environment”, in *International Journal of Biometeorology*, vol. 45, issue 2, pp. 100-108. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s004840100093 [Accessed 27 October 2023].
- DeKay, M. (2011), *Integral Sustainable Design – Transformative Perspectives*, Routledge, New York.
- DeKay, M. and Brager, G. (2023), *Experiential Design Schemas*, ORO Editions, Novato.
- DeKay, M. and Brown, G. Z. (2014), *Sun Wind and Light – Architectural Design Strategies*, John Wiley & Sons Ltd, Hoboken (New Jersey).
- Fodor, J. A. (1983), *The Modularity of Mind*, The MIT Press, Chicago.
- Folmer, A., Haartsen, T. and Huigen, P. P. P. (2019), “How ordinary wildlife makes local green places special”, in *Landscape Research*, vol. 44, issue 4, pp. 393-403. [Online] Available at: doi.org/10.1080/01426397.2018.1457142 [Accessed 27 October 2023].
- García García, E. (2005), “Modularidad de la mente y programas para el desarrollo de las inteligencias”, in *IberPsicología | Revista Electrónica de la Federación española de Asociaciones de Psicología*, vol. 10, issue 7, pp. 1-23.
- Hildebrand, G. (1991), *The Wright Space – Pattern and Meaning in Frank Lloyd Wright’s Houses*, University of Washington Press, Seattle.
- Hogan-O’Neill, W. (2021), *Prefabricated and Modular Architecture – Aligning Design with Manufacture and Assembly*, The Crowood Press, Ramsbury (UK).
- Holl, S. (2004), *Parallax – Architettura e Percezione*, Postmedia Books, Milano.
- Koolhaas, R. (2018), *Elements of Architecture*, Taschen, Milano.
- LaVine, L. (2001), *Mechanics and Meaning in Architecture*, University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Lechner, A. (2021), *Thinking Design – Blueprint for an Architecture of Typology*, Parks Books, Zurich.
- Mallgrave, H. F. (2015), *Empatia degli spazi – Architettura e neuroscienze*, Raffaello Cortina Editore, Milano.
- Martin, R., Iseringhausen, J., Weinmann, M. and Hullin, M. B. (2015), “Multimodal perception of material properties”, in *SAP 2015 | Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*, pp. 33-40. [Online] Available at: doi.org/10.1145/2804408.2804420 [Accessed 27 October 2023].
- Merleau-Ponty, M. (2003), *Fenomenologia della percezione*, Bompiani, Milano.
- Pallasmaa, J. (2005), *The Eyes of the Skin – Architecture and Senses*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex (UK). [Online] Available at: arts.berkeley.edu/wp-content/uploads/2016/01/Pallasmaa_The-Eyes-of-the-Skin.pdf [Accessed 27 October 2023].
- Pallasmaa, J., Mallgrave, H. F., Arbib, M. A. and Tidwell, P. (2013), *Architecture and Neuroscience*, Tapio Wirkkala-Rut Bryk Foundation, Espoo.
- Parnas, D. L. (1972), “On the Criteria to Be Used in Decomposing Systems into Modules”, in *Communications of the ACM*, vol. 15, issue 12, pp. 1053-1058. [Online] Available at: doi.org/10.1145/361598.361623 [Accessed 27 October 2023].
- Pasqualini, I., Llobera, J. and Blanke, O. (2013), “Seeing and Feeling Architecture – How Bodily Self-Consciousness Alters Architectonic Experience and Affects the Perception of Interiors”, in *Frontiers in Psychology*, vol. 4, article 354, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00354 [Accessed 27 October 2023].
- Salthe, S. N. (1985), *Evolving Hierarchical Systems – Their Structure and Representation*, Columbia University Press, New York. [Online] Available at: doi.org/10.7312/salt91068 [Accessed 27 October 2023].
- Scerif, G. and Karmiloff-Smith, A. (2001), “Genes and environment – What does interaction really mean?”, in *Trends in Genetics*, vol. 17, issue 7, pp. 418-419. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/S0168-9525\(01\)02337-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9525(01)02337-X) [Accessed 27 October 2023].
- Thiis-Evensen, T. (1987), *Archetypes in Architecture*, Scandinavian University Press, Oslo. [Online] Available at: doi.org/10.18261/9788215046419-2020 [Accessed 27 October 2023].
- von Bertalanffy, L. (1968), *General system theory – Foundations, development, applications*, Penguin, London.
- Wallance, D. (2021), *The Future of Modular Architecture*, Taylor & Francis, New York.
- Wilber, K. (2007), *The Integral Vision – A Very Short Introduction to the Revolutionary Integral Approach to life, God, the Universe, and Everything*, Shambhala, Boulder.

ARTICLE INFO

Received 15 October 2023
 Revised 20 October 2023
 Accepted 08 November 2023
 Published 31 December 2023

ARCHITETTURE MINIME PER IL PAESAGGIO Il modulo come strumento per la sostenibilità

MINIMAL ARCHITECTURES FOR LANDSCAPE The module as a tool for sustainability

Jorge Garcia Valdecabres, Daniela Besana

ABSTRACT

Il tema dell'emergenza ambientale è ormai al centro delle riflessioni sul modo di pensare e concepire il progetto di architettura. Il contributo sostiene l'opportunità di leggere il progetto edilizio come un processo circolare che possa, in tutte le fasi della progettazione, aiutare i progettisti a trovare risposte consapevoli e funzionali al tema dell'impatto ambientale delle costruzioni: ciò impone una necessaria revisione dei requisiti prestazionali del progetto che trovano una possibile risposta, completa ed efficace, nelle architetture modulari minime. Si ritiene infatti che il modulo in architettura possa essere concepito, a parità di elemento minimo base, come flessibile rispetto alle esigenze d'uso, ai contesti e alle prestazioni ottenibili. A dimostrazione di quanto esplicitato, si riportano esperienze di ricerca su questa concezione architettonica-progettuale.

The theme of environmental emergency is now at the forefront of discussions on how to plan and conceive architectural design. This paper argues for the opportunity to interpret building design as a circular process that can, at all stages, help designers find conscious and functional answers to the issue of the environmental impact of construction: this calls for a necessary review of the project's performance requirements, which can find a possible complete and adequate answer in minimal modular architectures. It is indeed believed that the module in architecture can be designed, given the same basic minimum element, as flexible with respect to usage requirements, contexts and achievable performance. To demonstrate the above, research experiences regarding this architectural-design concept are provided.

KEYWORDS

costruzione modulare, sostenibilità, flessibilità, prestazioni, processo progettuale

modular construction, sustainability, flexibility, performance, design process

Jorge Garcia Valdecabres, Architect and PhD, is a Professor at the Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación Universitat Politècnica de València (Spain). He carries out research activities mainly within the context of the conservation, recovery and valorisation of Cultural Heritage, focusing on asset management. E-mail: jgvalde@ega.upv.es

Daniela Besana, Building Engineer-Architect and PhD, an Associate Professor of Building Technology at the Department of Civil Engineering and Architecture (DICAr) of the University of Pavia (Italy). She carries out research on the project of reuse and valorisation of Cultural Heritage and traditional and innovative construction technologies for sustainable designs. Email: daniela.besana@unipv.it



Le attuali politiche internazionali orientano, con sempre maggior forza, le proprie azioni per contrastare l'emergenza ambientale che coinvolge ormai l'intero pianeta: l'innalzamento delle temperature, del livello dei mari e delle emissioni di CO₂ nell'ambiente, unito a sempre più frequenti e intensi eventi meteorologici estremi e imprevedibili, impone la presa di coscienza della necessità di cambiare radicalmente il modo di pensare e di agire (IPCC, 2021). Il mondo delle costruzioni è infatti tra i principali responsabili dell'impatto ambientale sul pianeta con il 35% di consumo di energia e il 38% di emissioni di CO₂, ma anche con un altrettanto impattante produzione di rifiuti e scarti (UNEP, 2020; Fig. 1).

In tale ottica obiettivo del contributo è investire un nuovo approccio al progetto di Architettura in grado di trovare possibili risposte immediate ed efficaci al tema ambientale, verso una 'nuova cultura della sostenibilità' (IEA, 2019). Se l'Architettura è disciplina in grado di trasformare e plasmare il costruito e il contesto nel quale si colloca, essa diventa oggi occasione per un generale ripensamento del modo di progettare in termini di sostenibilità ambientale, azione culturale basata sulla conoscenza, sulla sperimentazione e sull'innovazione sia di processo che di prodotto (Nocca, 2017). La sfida è legata alle necessità di pensare in un'ottica d'innovazione l'intera pianificazione e gestione del processo edilizio attraverso soluzioni tecnico-costruttive improntate alla circolarità di prodotto e di processo, a partire dalle scelte dei materiali naturali, ecologici e locali, dalla valutazione degli impatti di produzione, trasporto e messa in opera fino alle tematiche di gestione e manutenzione consapevole, di riuso e riutilizzo parziale, selettivo o globale dell'oggetto edilizio.

Stato dell'arte: impatto ambientale e processo edilizio | Gli SDGs dettagliatamente elencati e argomentati all'interno dell'Agenda 2030 (UN – General Assembly, 2015) impongono, con sempre maggiore urgenza, che l'intero Pianeta trovi soluzioni, strategie e risposte concrete a temi diversi tra loro integrati; in particolare, riferendosi gli Obiettivi nel settore edilizio, l'Agenda prevede un ambizioso taglio delle emissioni di gas serra del 60% al 2030 rispetto al 2015 quale azione centrale per la decarbonizzazione dell'economia, integrandosi così con la Legge Europea per il Clima (European Parliament, 2021; Gates, 2022). Risulta chiaro come l'intero settore edilizio, tanto per le nuove realizzazioni quanto per gli interventi sul costruito, sia al centro dell'European Green Deal (European Commission, 2019) e delle politiche di transizione ecologica (Chou, 2021). L'obiettivo è certamente sfidante: costruire e ristrutturare in modo efficiente sotto il profilo energetico e delle risorse per evitare che la Terra, da qui al 2050, venga depauperata di una quantità risorse pari a quella disponibile in tre pianeti (European Commission, 2020; Fig. 2).

Si prevede che nei prossimi quarant'anni il consumo complessivo di risorse come la biomassa, i combustibili fossili, i metalli e i minerali raddoppierà (OECD 2019) e parallelamente la produzione annuale di rifiuti aumenterà del 70% entro il 2050 (Silpa et alii, 2018). Poiché l'estrazione e la trasformazione delle risorse sono all'origine della metà delle emissioni totali di gas a effetto serra e di oltre il 90% della perdita di biodiversità e dello stress idrico, l'European Green Deal ha varato una

strategia concertata per un'economia climaticamente neutra, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva: un approccio improntato all'economia circolare condiviso da tutti i cittadini (utenti, aziende, imprese, ecc.) che contribuirà in modo significativo al conseguimento della neutralità climatica entro il 2050 e a una crescita economica disaccoppiata dall'uso delle risorse, garantendo al contempo la competitività a lungo termine dell'Unione Europea senza lasciare indietro nessuno (Balzani and Di Giulio, 2021; Scalisi and Ness, 2022).

Per concretizzare questa ambizione l'Unione Europea nel prossimo decennio deve accelerare la transizione verso un modello di crescita rigenerativo che restituisca al pianeta più di quanto prenda, riducendo contestualmente i consumi e raddoppiando la percentuale di utilizzo di materiali circolari (Tweed and Sutherland, 2007), ciò anche in ragione del fatto che annualmente ogni cittadino dell'Unione Europea genera in media 4,5 tonnellate di rifiuti, di cui circa la metà viene smaltita in discarica. Si tratta di numeri allarmanti che non siamo più in grado di sostenere sia in termini ambientali che economici e frutto di un modello lineare dell'economia che destina inevitabilmente ogni prodotto a un 'fine vita'.

Gli obiettivi fin qui esposti impongono dunque un sostanziale cambio di paradigma nel modo di progettare, allargando, pur con la specificità che ogni tema impone e richiede, la visuale dal progetto all'intero processo progettuale (Park Associati and Bollinger + Grohmann, 2021) attraverso un'attenta valutazione già nelle fasi preliminari che concorrono alla decisione di risorse e materiali, processi di produzione, impatti sul clima, consumi energetici, gestione del cantiere e del fabbricato durante la fase di esercizio, disassemblabilità e riuso dei componenti (Arup, 2016), il tutto possibile solo se i progettisti posseggono una visione d'insieme, sistemica e olistica con un approccio consapevole e sostenibile al progetto.

La reversibilità per le architetture modulari | Gli aspetti citati inducono quindi a considerare il tema ambientale con una inedita consapevolezza del problema da parte di tutti gli attori ma anche e soprattutto rispetto alla necessità di anticipare le questioni ambientali attraverso la scelta di soluzioni progettuali che siano non solo in grado di rimediare ai danni causati dai processi di produzione e consumo, ma soprattutto di intervenire in termini preventivi. Una ipotesi percorribile risiede nella possibilità di contrapporre al modello lineare quello di economia circolare (Ellen Mac Arthur Foundation, 2013), il cui principale obiettivo è oltrepassare il concetto di fine vita della materia riferendosi sostanzialmente a ciò che normalmente accade in natura, dove non esiste il rifiuto: tutto quello che viene prodotto ha uno scopo e lo scarto diventa nuova risorsa rimessa in circolo nell'ecosistema. Al contempo è necessario prevedere dei passaggi intermedi virtuosi come la riparazione o il riutilizzo dopo il consumo e prima dello smaltimento (Fig. 3).

Un tale cambio di prospettiva del processo edilizio che sposa i principi dell'economia circolare esplicita dunque la necessità di passare da un approccio 'cradle to grave' a uno 'cradle to cradle' (McDonough and Braungart, 2003), non dando dunque più per scontato un percorso che termina

con l'esaurimento della vita utile di un prodotto ma operando una valutazione e un'analisi preliminare, ancor prima della fase di progettazione, su come eliminare o ridurre al massimo rifiuti e scarti a fine vita di prodotti e beni.

Ciò su cui si vuole riflettere è come sia possibile trasporre in architettura i processi vitali della natura per rideterminare il comportamento dei nostri edifici in risposta all'emergenza ambientale (Tucci, 2017). A tal riguardo Mario Cucinella (2019, p. 21) richiama la necessità di non trascurare la sostenibilità nelle nostre città, perché quello che sta succedendo non ha precedenti nella storia: «Ad oggi abbiamo costruito grosso modo 145 miliardi di metri quadri [...]. Quello che preoccupa nel tempo più vicino, nei prossimi 15 anni è la previsione di crescita. Costruiremo la metà di tutto quello che abbiamo costruito fino ad oggi [...] 73 miliardi di metri quadrati che corrispondono grossomodo a un miliardo e mezzo di persone».

Al contempo l'Archistar richiama a una profonda riflessione sul modo di progettare i nostri edifici e sul contesto climatico nei quali vengono realizzati, invitando a non affidare solo alla tecnologia i requisiti prestazionali oggi necessari. «Prima ancora di nuove azioni, quindi, abbiamo bisogno di nuova etica e di un nuovo modo di concepire l'architettura e gli strumenti della progettazione [...] Dove troveremo tutte le risorse per [costruire] e poi l'energia per mantenere quegli edifici? [...] è obbligatorio fare un passo indietro e prendere consapevolezza di come negli ultimi due secoli abbiamo perso l'abilità di dialogare con il clima, confidando nella sola tecnologia come risposta alle nostre esigenze. Questo appiattimento sulla tecnologia ha ridotto le nostre conoscenze portandoci a creare edifici totalmente estranei ai luoghi e alle tradizioni in cui sorgono» (Cucinella, 2022).

L'impiego eccessivo e incondizionato dell'innovazione tecnologica ha dunque presentato un conto salato alla natura (Mario Cucinella Architects, 2020), tuttavia una possibile azione da mettere in campo non è certo il suo abbandono ma la ricerca per sviluppare nuovi materiali e tecniche a servizio del progetto, considerando quest'ultimo come processo circolare virtuoso (Fig. 4) a favore di una nuova relazione empatica tra architettura e ambiente. Una tale visione richiede inevitabilmente di confrontarsi con nuovi requisiti prestazionali legati ai temi della reversibilità del costruito per uno specifico territorio, della temporaneità di uso e dello sfruttamento di risorse non rinnovabili (Fig. 5), della flessibilità tipologica, prestazionale e funzionale in grado di rispondere a mutati quadri esigenziali, dell'autosufficienza energetica del prodotto edilizio e della potenziale esportabilità e trasformabilità a contesti diversi (Nocca, 2017).

Parallelamente l'European Green Deal amplia gli orizzonti del progetto proponendo una strategia di crescita che preveda non solo la riduzione delle emissioni di CO₂, ma anche un innalzamento degli standard di vita e nuove opportunità di lavoro legati a nuovi modelli di produzione, di consumo, di organizzazione sociale e del costruito (European Commission, 2021). Una certa direzione in questo senso è fornita dal 'system change compass' (SystemIQ and Club of Roma, 2020) che «[...] indirizza anche la pianificazione urbana intelligente, la riqualificazione di edifici sottoutilizzati, e una 'gestione dello spazio fluida e orientata all'autosufficienza' tramite l'aumento di edifici du-

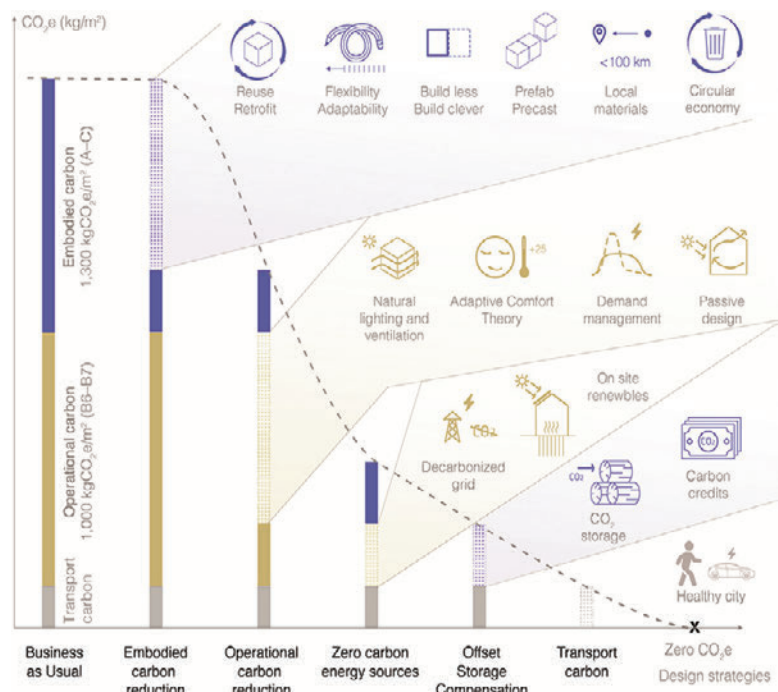
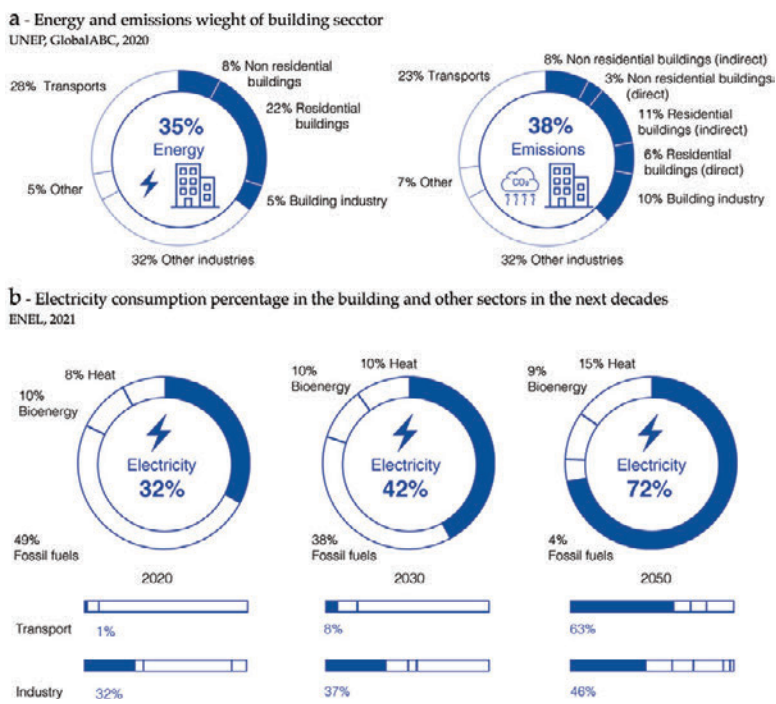


Fig. 1 | (a) Percentage of energy consumption and emissions of the building sector, 2019; (b) Increasing demand of electricity by the building sector: in 2050, it will be crucial to produce enough electricity to supply all the sectors as it will be the primary source of power (source: Besana and Tirelli, 2022).

Fig. 2 | Embodied and operational carbon timeline to complete decarbonisation in four phases: starting from the business-as-usual (BaU) condition, it is possible to reduce embodied and operational carbon and then offset/compensate for the remaining part; healthy-city principles can considerably reduce transport carbon (source: Tirelli and Besana, 2023).

revoli, modulari, efficienti e con un’equa quantità di spazio per persona’» (Ness, 2021, p. 23).

Rileggendo la Storia dell’Architettura è possibile ad esempio interpretare gli insegnamenti derivanti dalla prefabbricazione edilizia non solo come metodologia produttiva industriale in grado di rispondere ai nuovi requisiti prestazionali, ma soprattutto come strategia progettuale e operativa (Russo Ermolli and Galluccio, 2019). La realizzazione di componenti prefabbricati basati sul concetto di modulo diventa chiave importante di soluzioni a temi complessi e diversi (Wallace, 2021); in questo senso il Modulo in architettura può dunque essere interpretato come modulo architettonico, oggetto edilizio, che a seconda delle specificità di contesto per le quali è pensato, può assumere diverse declinazioni: modulo come elemento compositivo riconoscibile e identitario nel territorio, modulo tipologico e funzionale per rispondere alle esigenze di flessibilità o modulo tecnologico-costruttivo come risposta al soddisfacimento di requisiti prestazionali, esempio di comportamento virtuoso in termini di autosufficienza energetica nell’intero ciclo di vita.

La progettazione di moduli sostenibili, ai fini di una loro effettiva applicazione, richiede una necessaria discesa di scala sulla definizione di alcuni concetti cardine (Lauria, 2018). Un requisito prestazionale fondamentale è la reversibilità che rimanda conseguentemente al soddisfacimento di altri requisiti ad esso collegati, come ad esempio la flessibilità d’uso, tipologica, funzionale e prestazionale o l’autosufficienza energetica (Bologna, 2002). In linea generale sono definite reversibili tutte le soluzioni progettuali che possono garantire un elevato potenziale di riutilizzo dell’edificio, degli impianti, dei prodotti e dei materiali e che presentano un elevato potenziale di trasformazione. Disassemblaggio, adattabilità e riuso costituiscono il nucleo delle tre dimensioni della reversi-

bilità e come tali determinano i livelli spaziali e strutturali degli edifici reversibili. Un approccio progettuale incentrato specificatamente sulla reversibilità e flessibilità è riconducibile agli assunti teorici del Reversible Building Design (Durmisevic, 2018) che individua tre dimensioni come indicatori del carattere di trasformabilità di un edificio: reversibilità spaziale, tecnica e dei materiali.

La trasformazione spaziale ed edilizia si muove nella direzione di modificare la funzione dell’edificio ed è quindi legata alla scelta dello schema strutturale da analizzare durante la fase di fattibilità e di progettazione preliminare. Durante la fase di progettazione è possibile valutare la capacità dello spazio e della struttura di ospitare diverse funzioni senza causare grandi modifiche edilizie, demolizioni e perdite di materiale: minore è lo sforzo necessario per trasformare un edificio maggiore sarà il suo potenziale di trasformazione; maggiori le possibili soluzioni di riutilizzo e di trasformazione d’uso, maggiore sarà il potenziale di trasformazione dell’edificio in oggetto.

Nel progetto di architettura Durmisevic (2018) individua tre tipi principali di trasformazioni: la trasformazione monofunzionale, ossia la capacità di modificare la tipologia di layout all’interno di una funzione; la trasformazione transfunzionale, la capacità di modificare la funzione di un edificio; la trasformazione multidimensionale (denominata anche trasformabile), che integra le precedenti nonché l’intercambiabilità e la ricollocazione, ovvero la capacità di modificare una funzione con aggiunta caratteristica di flessibilità dimensionale, ossia con aumenti o riduzioni volumetriche, cinematismi o ricollocazioni in altra sede. Sempre Durmisevic (2019) individua i parametri di progettazione che influiscono sul potenziale di trasformazione e tra questi la tipologia edilizia, i dati dimensionali dell’edificio, la posizione e distanza dei nuclei rigidi, la tipologia del sistema strutturale, il me-

todo di costruzione, l’altezza interna e le aperture delle finestre.

Alla luce di quanto sopra si configura l’assunto che tanto più si progetta alla scala del modulo edilizio aggregabile e componibile secondo diverse configurazioni, più alto risulterà il grado di reversibilità del progetto e quindi la risposta edilizia ai temi della circolarità e della sostenibilità. Entrando più specificatamente all’interno della progettazione tecnologica, come strumento per controllare l’effettiva reversibilità, è possibile individuare tre livelli di composizione / scomposizione tecnica: la disposizione dei sistemi, che sono portatori delle principali funzioni dell’edificio (costruzione portante, finiture e partizioni in un’ottica anche di successiva manutenzione), la disposizione dei componenti che sono portatori delle sottofunzioni del sistema e infine la disposizione degli elementi e dei materiali, che sono portatori delle funzioni dei componenti (Durmisevic, 2006).

L’impianto strutturale di un edificio governa il controllo della reversibilità secondo tre ambiti di progettazione, funzionale, tecnica e fisica: il primo si occupa della scomposizione e allocazione funzionale, definendo le dipendenze funzionali; la seconda della disposizione gerarchica dei materiali da costruzione e delle loro relazioni; la terza delle interfacce che definiscono l’integrità fisica e le dipendenze della struttura. In particolare il tema della reversibilità tecnica porta al controllo in fase di progetto di due requisiti prestazionali: intercambiabilità e smontabilità (Galle and De Temmerman, 2013).

La prima si riferisce alla capacità del sistema costruttivo di consentire la sostituzione di componenti ed elementi del sistema edilizio con altri simili per dimensioni, caratteristiche e funzioni senza necessità di ricorrere a interventi di modifica e adattamento degli elementi del sistema che circondano la parte da sostituire; questa proprietà facilita la manutenzione del sistema edilizio o la sua

implementazione tecnologica nel tempo, ma consente anche la trasformabilità spaziale dell'edificio per adattarlo a funzioni diverse durante il ciclo di vita.

La seconda si riferisce alla possibilità che il sistema costruttivo permetta la separazione delle sue parti costitutive senza danneggiare o compromettere l'integrità dei componenti, in modo da favorire il riciclo dei materiali o il reimpiego in altre costruzioni ove possibile. Tale approccio trova le sue radici teoriche con i principi di 'open building' (Habraken, 1972), cioè di una progettazione che tiene conto delle eventuali modifiche o trasformazioni di un edificio durante il suo ciclo di vita in ragione di cambiamenti sociali, funzionali e tecnologici (Scalisi and Sposito, 2021). Da qui lo sviluppo dei principi del Design for Disassembly con implicazioni tanto sulle modalità esecutive dell'opera, impiegando tecnologie a secco e prefabbricate rispetto a tecnologie umide per consentire una migliore separazione tra elementi tecnici, componenti e materiali (Akinade et alii, 2017), quanto sul disegno e sulla progettazione delle relazioni tra gli elementi attraverso giunti e connessioni reversibili (Fig. 6).

Secondo Durmisevic (2006) le scelte preliminari progettuali si possono basare su otto criteri utili ad indirizzare la progettazione: 1) indipendenza funzionale di ogni componente che vede nella loro separazione totale la migliore soluzione, come nel caso della S/R – Struttura/Rivestimento (Imperadori, 2008); 2) sistematizzazione dei singoli sottosistemi come raggruppamento di elementi in un modulo indipendente basato su funzionalità, montaggio / smontaggio, coordinamento del ciclo di vita degli elementi e ciclo di vita d'uso previsto; 3) minimizzazione del numero di relazioni che rappresentano le dipendenze funzionali e tecniche tra gli elementi di un edificio a favore dei principi di assemblabilità e sostituibilità dei componenti; 4) definizione del modulo base della configurazione e

degli elementi per permettere l'indipendenza e la separazione fisica tra i vari sottosistemi funzionali dell'organismo edilizio; 5) modalità sequenziale o in parallelo delle attività di montaggio / smontaggio (se l'assemblaggio sequenziale rende meno efficace la sostituibilità dei componenti in quanto crea maggiori vincoli reciproci, il montaggio in parallelo rende meno vincolati tra loro gli elementi, facilita le operazioni di sostituzione e modifica e consente di velocizzare il processo di costruzione dell'opera); 6) progetto della forma e della geometria dei componenti in funzione del montaggio e smontaggio senza danneggiamento e quindi con possibilità di riutilizzo; 7) individuazione del tipo di connessione a secco, meccanica o chimica per agevolare assemblaggio e disassemblaggio; 8) coordinamento del ciclo di vita secondo il principio generale per cui materiali dotati di un ciclo di vita più breve dovrebbero essere montati per ultimi ma smontati per primi (Fig. 7).

A partire quindi dalla definizione dei suddetti principi prestazionali sono disponibili soluzioni e strategie di prefabbricazione e stratificazione a secco mirate alla progettazione di kit di assemblaggio di componenti: tanto più si lavora con i principi della progettazione modulare, sia essa intesa come modulo planimetrico, modulo e sottomodulo di organizzazione spaziale tra struttura, partizioni, arredo, modulo di facciata o modulo tridimensionale, maggiore sarà il grado di reversibilità e quindi l'impatto della circolarità del processo edilizio (Fig. 8).

Modulo architettonico di piccola scala per il paesaggio

L'approccio proposto da Durmisevic trova un ampio grado di applicazione ed esportabilità a tutte le scale di progetto a partire dalle architetture minime modulari che, per combinazione e aggregazione di un medesimo elemento, possono generare diverse tipologie d'uso attraverso differenti

linguaggi architettonici, preservando una propria reversibilità e riconoscibilità sul territorio in cui vengono progettate: l'architettura modulare minima consente, a partire da una chiara definizione dei requisiti prestazionali, un'ampia applicazione in luoghi e contesti diversi oltre che una molteplicità di soluzioni progettuali e funzionali.

Il modulo può essere impiegato anche come possibile strumento per attuare le politiche di sostenibilità ambientale e le più generali politiche internazionali di valorizzazione del Patrimonio paesaggistico sia italiano che europeo. Numerosi sono i paesaggi che possono essere percorsi a piedi, in bicicletta, sull'acqua – a scopo turistico o di pellegrinaggio – caratterizzati da realtà sempre diverse e mutevoli ma specifiche e da preservare nel loro carattere identitario. Paesaggi rurali e urbanizzati con suoli e colori diversi, contesti topografici e climatici differenti e percorsi e vedute che mutano rispetto ai parametri tempo e spazio richiedono al progetto la rispondenza a un quadro esigenziale-prestazionale in costante mutazione.

In quest'ottica si richiama, a titolo puramente esemplificativo, il tracciato turistico della ciclovia Ven-To che collega Venezia e Torino e che, lungo un percorso unitario, attraverso contesti paesaggistici differenti intersecandosi con percorsi tematici eno-gastronomici, turistico architettonici o paesaggistici, serviti da strutture modulari alla piccola scala, concepite secondo tecniche e principi di reversibilità, fortemente identitarie e riconoscibili lungo tutto il percorso, ma flessibili per esigenze d'uso nel rispetto del territorio (Figg. 9-11).

Analogamente è possibile richiamare il tracciato turistico-religioso della via Francigena che collega Roma a Canterbury lungo il quale, pur con le varietà proprie dei paesaggi che attraversa, moduli edilizi concepiti tutti con sistema costruttivo a secco riescono a generare nella loro composizione un'ampia variazione tipologica e un'adeguata ri-

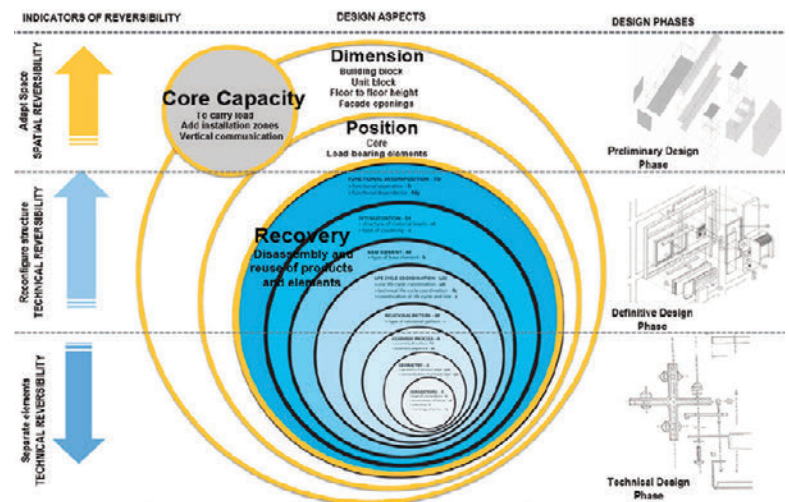
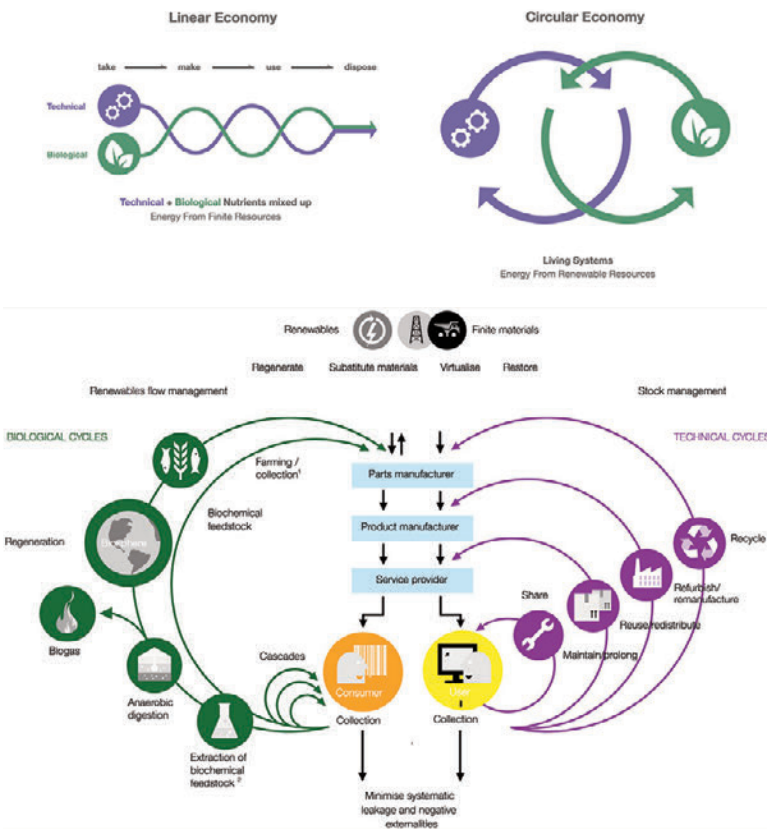


Fig. 3 | Linear economy versus circular economy in the built environment (source: Arup, 2016).

Fig. 4 | Reversible building protocol integrating spatial and technical aspects of reversibility (source: Durmisevic, 2019).

TEMI DI PROGETTO - SOSTENIBILITÀ NELLE SUE 3 DIMENSIONI: Ambientale, Economica e Sociale

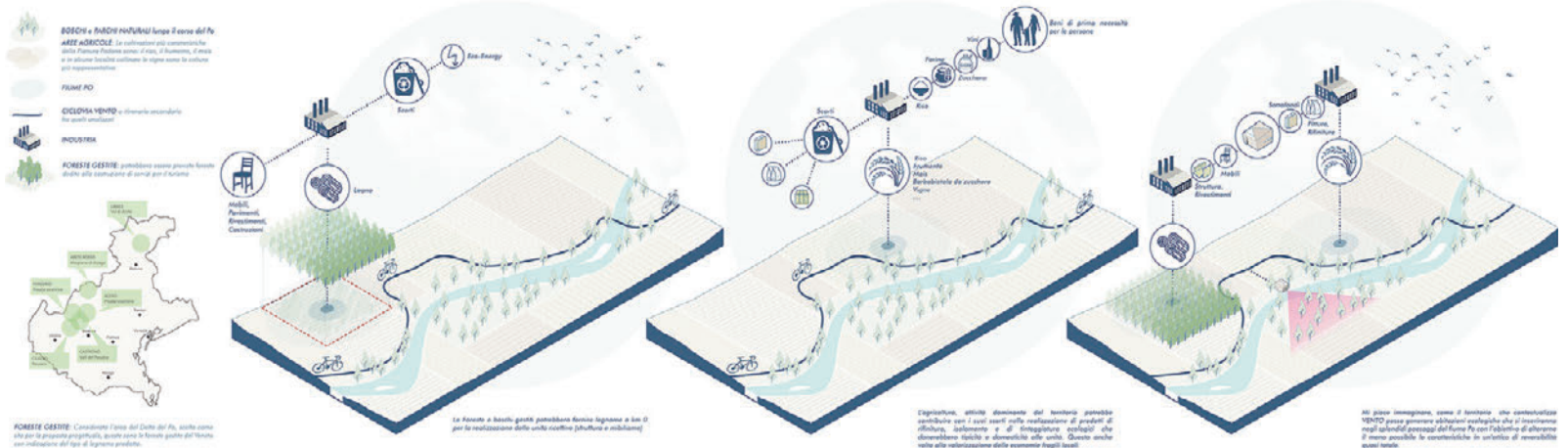


Fig. 5 | Sustainable concept design of an architectural module along the Ven-TO route (credit: C. Caroli and D. Besana, 2019).

spondenza a differenti quadri esigenziali: nell'eterogeneità del percorso le architetture modulari di piccola scala rispondono a specifiche esigenze di uso – spazi di ristoro, di servizio, di pernottamento, informativi e religiosi – favorendo il controllo del processo edilizio in un'ottica di disassemblaggio per parti e per componenti e garantendo la reversibilità del luogo di insediamento (Fig. 12).

A dimostrazione della numerosità delle casistiche sulle quali poter lavorare con la stessa metodologia progettuale è possibile in ultimo citare i percorsi e le reti ciclabili ricavabili tra tracciati ferroviari dismessi come nel caso della Riviera Ligure (Figg. 13, 14) o i canali d'acqua, lungo i fiumi o lungo i navigli. Pur nella loro specificità, ogni percorso o rete ha caratteristiche analoghe in tema di requisiti di progetto, potendo rispondere con un'architettura di piccola scala, elemento riconoscibile nel territorio, alle specifiche esigenze funzionali dei diversi luoghi (Fig. 15). L'architettura modulare minima offre quindi una possibile risposta alla valorizzazione di un territorio attraverso un elemento identitario seppur specifico delle diverse destinazioni d'uso, in un'ottica di sostenibilità e piena conoscenza del luogo in cui si insedia.

Conclusioni | Il presente saggio ha sostenuto che il progetto di Architettura, attraverso tecnica e tecnologia, possa dare risposte adeguate (validate da attività di ricerca e sperimentazioni condotte in ambiti differenti) e innovative in termini di controllo e impatto ambientale, attraverso un approccio modulare di piccola scala, grazie alle sue caratteristiche di componibilità, ripetibilità e versatilità (funzionali e spaziali) che garantiscono alti livelli prestazionali e qualitativi.

Per raggiungere un tale obiettivo al progetto si richiede l'implementazione di nuovi requisiti prestazionali riconducibili ai principi e alle strategie del Reversible Building Design in tutte le fasi del processo, in particolare nella fase preliminare del progetto poiché l'integrazione tardiva della reversibilità nella progettazione può incidere pesantemente sulla sostenibilità ambientale, economica e sociale del costruito. Il progetto può così rispondere alle esigenze del contesto, della società e del territorio nel quale si inserisce, esprimendo una qualità edilizia, linguistica e architettonica a servizio della fruizione e valorizzazione di un territorio e mantenendo i suoi caratteri di riconoscibilità.

Ad oggi un tema ancora aperto è la trasposizione del modulo dalla progettazione di piccola scala a quella di un'architettura più complessa ed estesa in cui sviluppare con la medesima attenzione principi e strategie del Reversible Building Design. Una particolare linea di ricerca in questa direzione potrebbe partire proprio dalla definizione di requisiti e parametri prestazionali da codificare in linee guida generali, verificando l'applicabilità a contesti diversi e a scale differenti.

Current international policies are increasingly directing their actions to counter the environmental emergency that now involves the entire planet: the rise in temperatures, sea levels and emissions of CO₂ in the environment, combined with increasingly frequent and intense extreme and unpredictable weather events, mandates an awareness of the need to radically change the way we think and act (IPCC, 2021). The construction sector is, in fact, among the main contributors to the environmental impact on the planet, with 35% of energy consumption and 38% of CO₂ emissions but also with an equally impactful production of waste as refuse (UNEP, 2020; Fig. 1).

In this perspective, the contribution aims to investigate a new approach to Architectural design that can find possible immediate and effective responses to the environmental issue toward a 'new culture of sustainability' (IEA, 2019). If Architecture is a discipline capable of transforming and shaping the built environment and the context in which it is placed, it now becomes an opportunity for a general rethinking of the way we design in terms of environmental sustainability, a cultural action based on knowledge, experimentation and innovation in both process and product (Nocca, 2017).

The challenge is related to the need to rethink from an innovation perspective the entire planning and management of the building process through technical-constructive solutions oriented on product and process circularity, starting from the choices of natural, ecological and local materials, from the assessment of the impacts of production, transport and installation to the issues of conscious management and maintenance, partial, selective or global reuse and reuse of the building object.

State of the art: environmental impact and the building process | The SDGs detailed and articulated within the 2030 Agenda (UN – General Assembly, 2015) impose, with increasing urgency, that the entire Planet must find solutions, strategies and concrete responses to different interconnected issues; in particular, tailoring the Goals to the building sector, the Agenda calls for an ambitious 60% cut in greenhouse gas emissions by 2030 (compared to 2015) as a central action for the decarbonisation of the economy, thus complementing the European Climate Act (European Parliament, 2021; Gates, 2022). It is clear that the entire building sector, both for new construction as well as for interventions on the built environment, is at the centre of the European Green Deal (European Commission, 2019) and green transition policies (Chou, 2021). The goal is undoubtedly challenging: to build and renovate in an energy and resource-efficient way, with the certainty that, although there is only one planet Earth, the latter will consume resources equal to three planets between now and 2050 if the situation does not change (European Commission, 2020; Fig. 2).

The total consumption of resources such as biomass, fossil fuels, metals and minerals is expected to double in the next four decades (OECD 2019), and in parallel, annual waste generation is expected to increase by 70% by 2050 (Silpa et alii, 2018). Since resource extraction and processing account for half of total greenhouse gas emissions and more than 90% of biodiversity loss and water stress, the European Green Deal has launched a concerted strategy for a climate-neutral, resource-efficient and competitive economy: a circular economy approach shared by all citizens (users, companies, businesses, etc.) that will significantly contribute to achieving climate neutrality by 2050 and to economic growth decoupled from resource use, while ensuring the long-term competitiveness of the European Union without leaving anyone behind (Balzani and Di Giulio, 2021; Scalisi and Ness, 2022).

To make this ambition a reality, within the next decade, the European Union must accelerate the transition to a regenerative growth model that gives back to the planet more than it takes, while at the same time reducing consumption and doubling the proportion of circular material use (Tweed and Sutherland, 2007), partly because each EU

citizen generates an average of 4.5 tons of waste annually, about half of which is disposed of in landfills. These alarming numbers can no longer be sustained in both environmental and economic terms, and are the result of a linear economy model that inevitably destines every product to an 'end-of-life'.

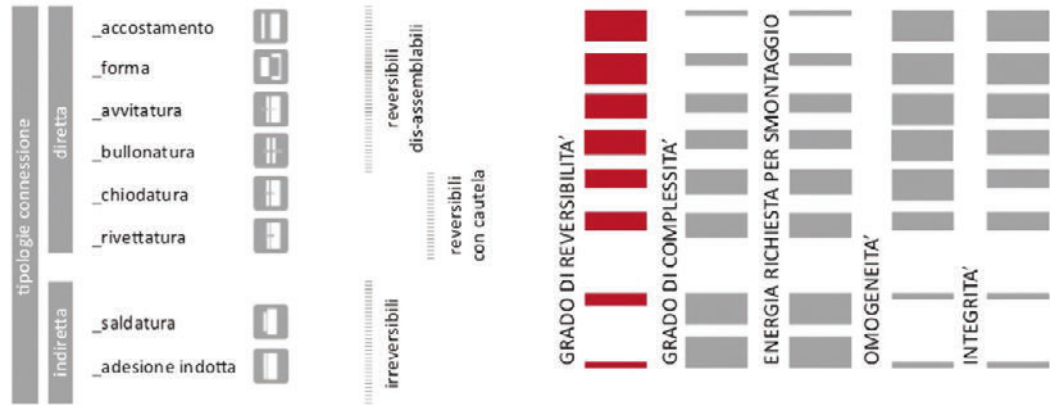
The objectives set out so far, therefore, impose a substantial paradigm shift in the way of designing, broadening the view from the project to the entire design process (Park Associati and Bollinger + Grohmann, 2021), albeit with the specificity that each theme imposes and requires, through careful evaluation as early as the preliminary stages that contribute to the decision of resources and materials, production processes, climate impacts, energy consumption, site and building management during the operational phase, disassembly and reuse of components (Arup, 2016), all possible only if architects possess a comprehensive, systemic and holistic view with a conscious and sustainable approach to the project.

Reversibility for modular architectures | The aforementioned aspects thus lead to a new awareness in considering the environmental issue on behalf of all parties, also and especially with respect to the need to anticipate environmental issues through the choice of design solutions that are not only able to remedy the damage caused by production and consumption processes, but above all to intervene in preventive terms. A viable hypothesis lies in the possibility of contrasting the linear model with the circular economy model (Ellen Mac Arthur Foundation, 2013), whose main objective is to go beyond the concept of material end-of-life by basically referring to what normally happens in nature, where there is no such thing as waste: everything that is produced has a purpose and waste becomes a new resource recirculated back into the ecosystem. At the same time, it is necessary to envisage virtuous intermediate steps such as repair or reuse after consumption and before disposal (Fig. 3).

This shift in the perspective of the building process embraces the principles of the circular economy and thus explicitly addresses the need to move from a 'cradle to grave' to a 'cradle to cradle' approach (McDonough and Braungart, 2003), no longer taking for granted a pathway that ends with the exhaustion of a product's useful life but making a preliminary assessment and analysis, even before the design phase, on how to eliminate or minimise waste and waste at the end of life of products and goods.

The aim is to reflect on how nature's life processes can be transposed into architecture to re-determine the behaviour of our buildings in response to the environmental emergency (Tucci, 2017). In this regard, Mario Cucinella (2019, p. 21) points out the need to avoid neglecting sustain-

Tipologie di connessione



#04_House 19
<http://www.kortekniestuhlmacher.nl/>



#Struttura di elevazione
#Struttura di fondazione puntuale; elementi prefabbricati in cls con cuscinetti di appoggio in gomma, elemento di sostegno in xlam
#Chiusura verticale opaca
 pannelli xlam a 5 strati, pannello isolante in schiuma rigida sp. 70 mm, correnti in legno 44/89 mm, guaina impermeabilizzante e finitura con pannello stratificato di legno verniciato;
#Chiusura orizzontale superiore
 pannelli xlam a 5 strati, pannello isolante in schiuma rigida sp. 50 mm, guaina impermeabilizzante;
#Chiusura orizzontale inferiore
 pannelli xlam a 5 strati, correnti di sostegno in legno sp. 44mm, pannello isolante in schiuma rigida sp. 20 mm, pannello OSB rivestito in resina epossidica sp. 18 mm;
#Chiusura verticale trasparente
 vetri isolanti

#Chiusura verticale opaca
 >sequenza strati funzionali
 1_2_3_4_5_strato strutturale
 6_strato di supporto
 7_strato di isolamento termico
 8_strato di tenuta all'acqua
 9_strato di rivestimento esterno
 >sequenza materiali
 1_2_3_4_5_pannello in legno laminato, sp. 26 mm
 6_correnti in legno, sp. 89 mm
 7_pannello in polistirene espanso EPS, sp. 70 mm
 8_membrana bituminosa, sp. 0,76 mm
 9_pannello in stratificato di legno, sp. 25 mm
 >sequenza connessioni
 1-2_2-3_3-4_4-5_adesione indotta
 5-6_avvitatura
 6-7_accostamento
 7-8_adesione indotta
 8-9_avvitatura

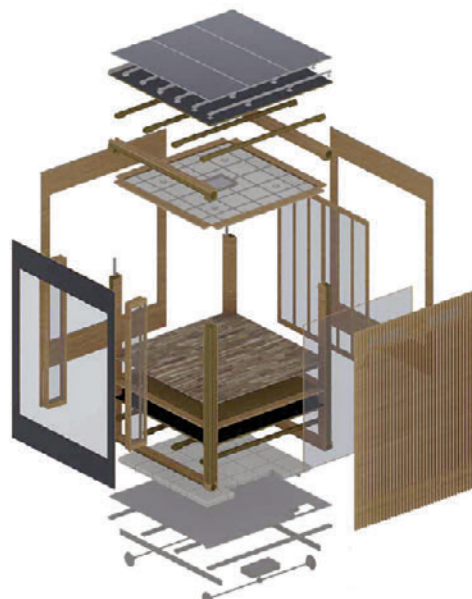
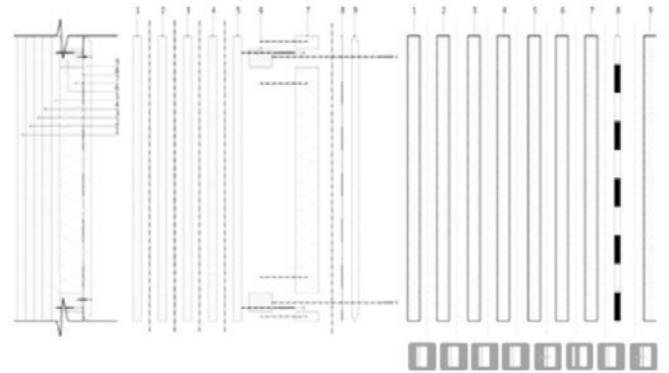


Fig. 6 | Systems and types of connections between modular components of the building system (source: Bazzana, 2009).

Fig. 7 | Example form of the technological design on a case study to analyse the type of collection and the constructive system (source: Bazzana, 2009).

Fig. 8 | Modular and combinable module designed with Structure/Envelope (S/E) technology and reversibility principles (credit: D. Besana, 2023).



Fig. 9 | Preliminary functional analysis of tourism and of historical and literature events along the Ven-To route to design a new recognisable architectural module (credit: C. Caroli and D. Besana, 2019).

ability in our cities because what is happening is unprecedented in history: to date, we have roughly built 145 billion square meters, with a worrying growth forecast for the next 15 years, as it is expected that we will build half the amount of everything we have built to date, i.e. 73 billion square meters that roughly corresponds to one and a half billion people.

At the same time, the archistar calls for deep reflection on the way we design our buildings and the climatic context in which they are built, urging us not to rely solely on technology for the performance requirements that are necessary today. «Thus, new actions need to be preceded by new way to view architecture and design methods. [...] Where will we find all the resources to do this [to design], as well as the energy needed to maintain these buildings? [...] we need to take a step back and understand how, over the last two centuries, we have lost the ability to communicate with the climate, relying exclusively on technology to serve our needs. This technological simplification has reduced our awareness, leading us to create buildings that are completely alien to their surroundings» (Cucinella, 2022).

The excessive and unconditional reliance on technological innovation has consequently come with a hefty bill to nature (Mario Cucinella Architects, 2020); however, this must not be abandoned

but instead employed in the development of new materials and techniques to serve the project, considering the latter as a virtuous circular process (Fig. 4) in favour of a new empathetic relationship between architecture and the environment. Such a vision inevitably requires addressing new performance requirements related, for example, to the issues of reversibility of the built environment for a specific territory, temporariness of use and exploitation of non-renewable resources (Fig. 5), typological, performance and functional flexibility capable of responding to changing demand frameworks, energy self-sufficiency of the building product, and potential exportability and transformability to different contexts (Nocca, 2017).

At the same time, the European Green Deal expands project horizons by proposing a growth strategy that includes not only the reduction of CO₂ emissions but also an increase in living standards and new job opportunities linked to new models of production, consumption, social organisation and the built environment (European Commission, 2021). Some direction in this regard is provided by the 'system change compass' (SystemIQ and Club of Roma, 2020), which «[...] also champions smart urban planning, repurposing underutilised buildings, and 'fluid and sufficiency-oriented space management' by 'increasing provision of durable and modular, space-efficient

buildings with sufficiency-oriented amount of space per person'» (Ness, 2021, p. 29).

A reread of the History of Architecture, for example, makes it possible to interpret the learnings from building prefabrication not only as an industrial production methodology capable of responding to new performance requirements but more importantly as a design and operational strategy (Russo Ermolli and Galluccio, 2019). The realisation of prefabricated components based on the module concept becomes a primary key to finding solutions for complex and diverse issues (Wallance, 2021); in this sense, the Module in architecture can, therefore, be interpreted as an architectural module, a building object, which, depending on the context specificities for which it is designed, can take on different declinations: Module as a recognisable and identifiable compositional element in the territory, typological and functional module to respond to the need for flexibility or technological-constructive module as a response to the fulfilment of performance requirements, an example of virtuous behaviour in terms of energy self-sufficiency in the entire life cycle.

The design of sustainable modules, for their effective implementation, requires a necessary downward scaling on defining certain pivotal concepts (Lauria, 2018). A key performance requirement is reversibility, which consequently refers to the ful-

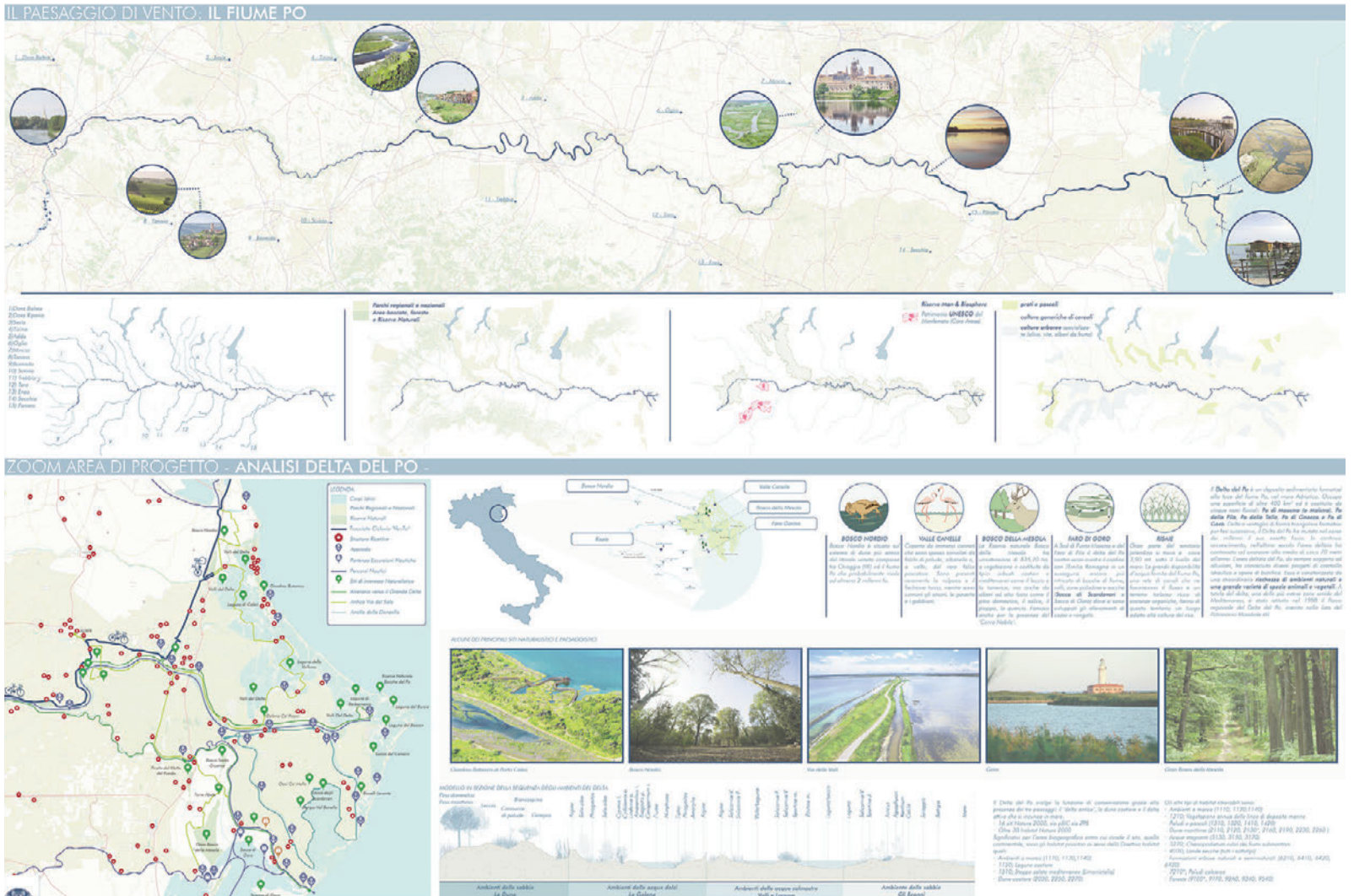


Fig. 10 | Preliminary analysis of natural and landscape features along the Ven-To route to design a new recognisable architectural module; below, a deeper analysis of a specific area (credit: C. Caroli and D. Besana, 2019).

film of other related requirements, such as typological, functional and performance flexibility of use or energy self-sufficiency (Bologna, 2002). As a general rule, all design solutions that can ensure a high potential for reuse of the building, facilities, products and materials and that have a high potential for transformation are defined as reversible. Disassembly, adaptability and reuse form the core of the three dimensions of reversibility and, as such, determine the spatial and structural levels of reversible buildings. A design approach focused specifically on reversibility and flexibility can be traced to the theoretical assumptions of Reversible Building Design (Durmisevic, 2018), which identifies three dimensions as indicators of a building's transformability character: spatial, technical and material reversibility.

Spatial and building transformation moves in the direction of changing the function of the building and is, therefore, related to the choice of structural scheme to be analysed during the feasibility and preliminary design phase. During the design phase, it is possible to assess the spatial and structural capacity to accommodate different functions without causing major building modifications, demolitions and material losses: the lower the effort required to transform a building, the higher its transformation potential; the more possible solutions for reuse and transformation of

use, the greater the transformation potential of the building in question.

In the architectural project, Durmisevic (2018) identifies three main types of transformations: monofunctional transformation, which is the ability to change the type of layout within a function; transfunctional transformation, the ability to change the function of a building; multidimensional transformation (also called transformable), which integrates the previous ones as well as interchangeability and relocation, which is the ability to change a function with added characteristic of dimensional flexibility, i.e., with volumetric increases or decreases, kinematics or relocations to other premises. Durmisevic (2019) again identifies design parameters that affect the potential for transformation, and these include building type, building dimensional data, location and distance of rigid cores, structural system type, construction method, interior height, and window openings.

In light of the above, it is possible to assume that the more one designs at the scale of the aggregable and modular building module according to different configurations, the higher the degree of reversibility of the project and thus the building response to circularity and sustainability issues. Delving more specifically within technological design, as a means of controlling effective reversibility, it is possible to identify three levels of technical

composition / decomposition: the arrangement of systems, carriers of the building's main functions (load-bearing construction, finishings, and partitions with a view also to subsequent maintenance), the arrangement of components, carriers of the system's subfunctions, and finally the arrangement of elements and materials, carriers of the components' functions (Durmisevic, 2006).

The structural layout of a building controls reversibility according to three design domains, functional, technical and physical: the first deals with the functional breakdown and allocation, defining functional dependencies; the second with the hierarchical arrangement of building materials and their relationships; and the third with the interfaces that define the physical integrity and dependencies of the structure. In particular, the issue of technical reversibility leads to control at the design stage of two performance requirements: interchangeability and disassemblability (Galle and De Temmerman, 2013).

The first refers to the ability of the building system to enable the replacement of components and elements of the building system with others that are similar in size, characteristics and functions without the need to resort to modification and adaptation of the system elements surrounding the part to be replaced; this property facilitates the maintenance of the building system or its tech-

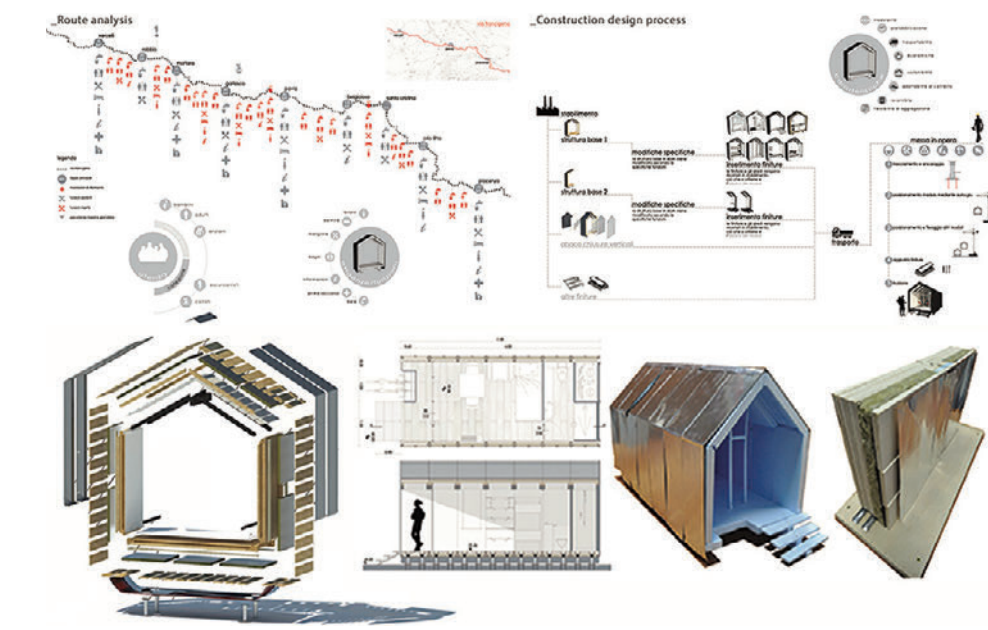
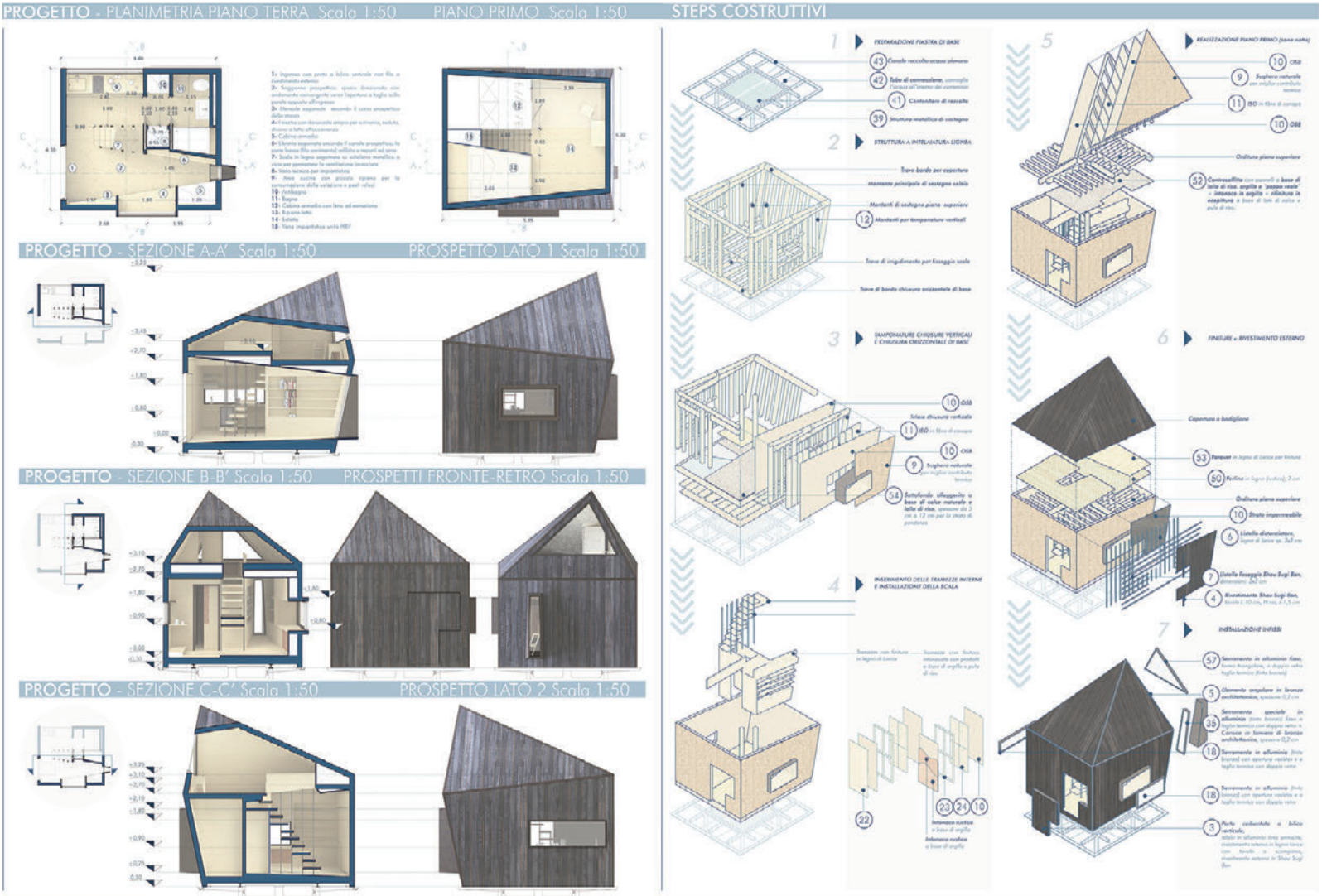


Fig. 11 | Design proposal of an architectural S/E module along the Ven-To route (credit: C. Caroli and D. Besana, 2019).
Fig. 12 | Design proposal of a repeatable and identifying architectural module along the Via Francigena route with different functions depending on user's needs (credit: D. Besana, 2014).
 Next page
Fig. 13 | Design proposal for a repeatable, identifying architectural S/E module with different functions along the old railway route of the Ligurian Riviera now used as a path that can be travelled on foot and by bicycle (credit: D. Besana, 2019).
Fig. 14 | Design proposal for a repeatable, identifying architectural S/E module located in different places along the old railway route of the Ligurian Riviera (credit: D. Besana, 2019).

nological implementation over time but also enables the spatial transformability of the building to accommodate different functions over its life cycle.

The second refers to whether the construction system allows the separation of its constituent parts without damaging or compromising the integrity of the components to facilitate the recycling of materials or reuse in other constructions where possible. This approach finds its theoretical roots in the principles of 'open building' (Habraken, 1972), namely design that takes into account the possible modifications or transformations of a building during its life cycle due to social, functional and technological changes (Scalisi and Sposito, 2021). Hence, the development of the principles of Design for Disassembly, with implications both on the construction methods, employing dry and prefabricated technologies as opposed to wet technologies to allow for better separation between technical elements, components and materials (Akinade et alii, 2017), and on the design and planning of the relationships between elements through reversible joints and connections (Fig. 6).

According to Durmisevic (2006), preliminary design choices can be based on eight criteria helpful in guiding the design: 1) functional independence of each component, whereby their total separation is seen as the best solution, as in the case of S/E – Structure/Envelope (Imperadori, 2008); 2) systematization of individual sub-systems as a grouping of elements into an independent module based on

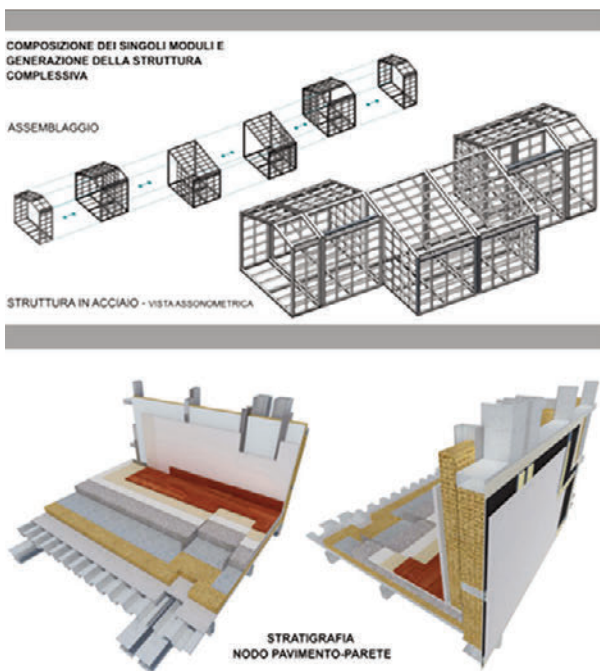
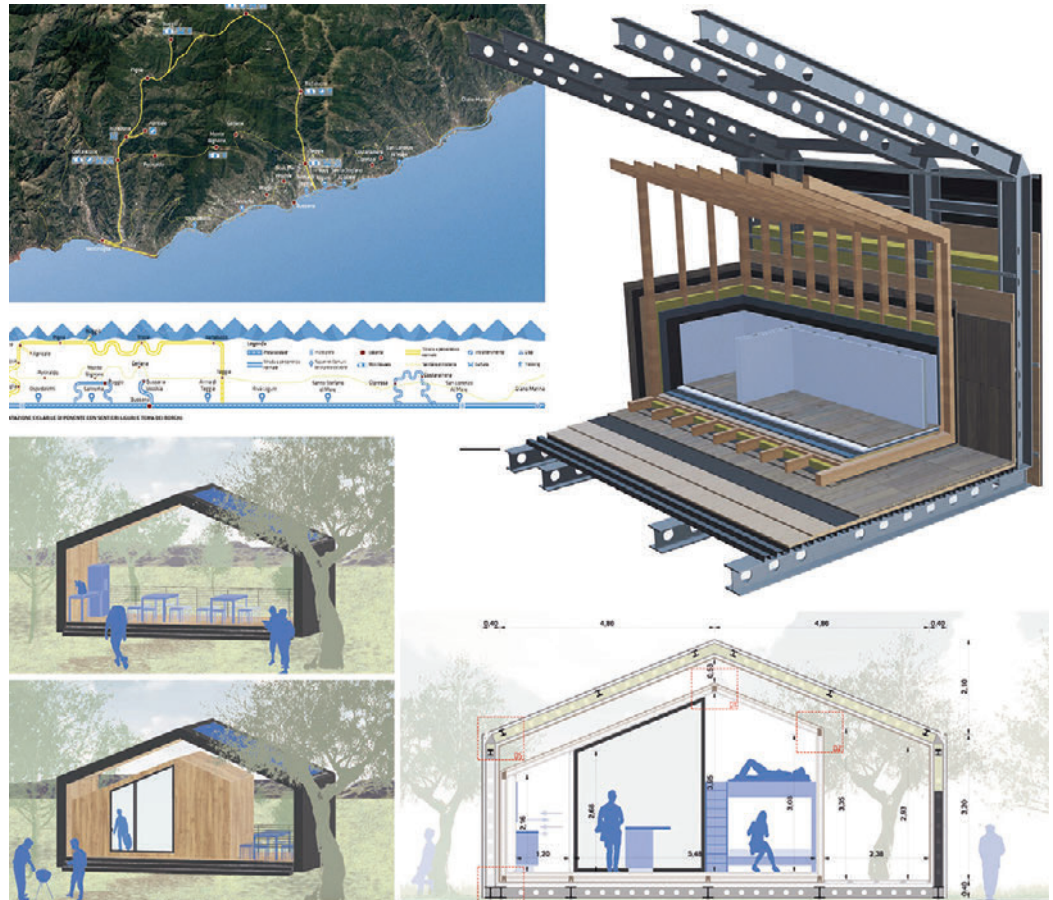
functionality, assembly / disassembly, coordination of element life cycle, and intended use life cycle; 3) minimization of the number of relationships representing functional and technical dependencies between the elements of a building in favour of the principles of assemblability and replaceability of components; 4) definition of the basic configuration module and of the elements for enabling independence and physical separation between the various functional subsystems of the building organism; 5) sequential or parallel mode of assembly / disassembly activities (while sequential assembly makes the replaceability of components less effective because it creates more mutual constraints parallel assembly makes the elements less constrained to each other, facilitates replacement and modification operations, and speeds up the construction process); 6) design of the shape and geometry of components according to assembly and disassembly without damage and thus allowing for reuse; 7) identification of the type of dry, mechanical or chemical connection to facilitate assembly and disassembly; 8) life cycle coordination according to the general principle that materials with shorter life cycles should be assembled last but disassembled first (Fig. 7).

Hence the availability of solutions and strategies of prefabrication and dry layering aimed at the design of component assembly kits, based on the definition of the aforementioned performance principles: the more work is done with the principles of modular design, whether understood as a plan module, module and sub-module of spatial organisation between structure, partitions, furniture, facade module or three-dimensional module, the greater the degree of reversibility and thus the impact of the circularity of the building process (Fig. 8).

Small-scale architectural module for the landscape | The approach proposed by Durmisić finds a wide degree of application and exportability at all scales of design starting from the modular minimal architectures that, by combination and aggregation of the same element, can generate

different types of use through different architectural languages, thus preserving their reversibility and recognizability on the territory in which they are designed: minimal modular architecture allows, from a clear definition of performance requirements, a wide application in different places and contexts as well as a multiplicity of design and functional solutions. The module can also be used as a possible tool for implementing environmental sustainability policies and more general international policies to valorise Landscape Heritage,

whether Italian or European. Numerous landscapes can be traversed on foot, by bicycle, or on water – for tourism or pilgrimage purposes – characterised by ever-changing and diverse realities but specific and to be preserved in their identity character. Rural and urbanised landscapes with different soils and colours, different topographical and climatic contexts, and changing paths and views with respect to time and space parameters require the project to respond to a constantly changing demand-performance framework.



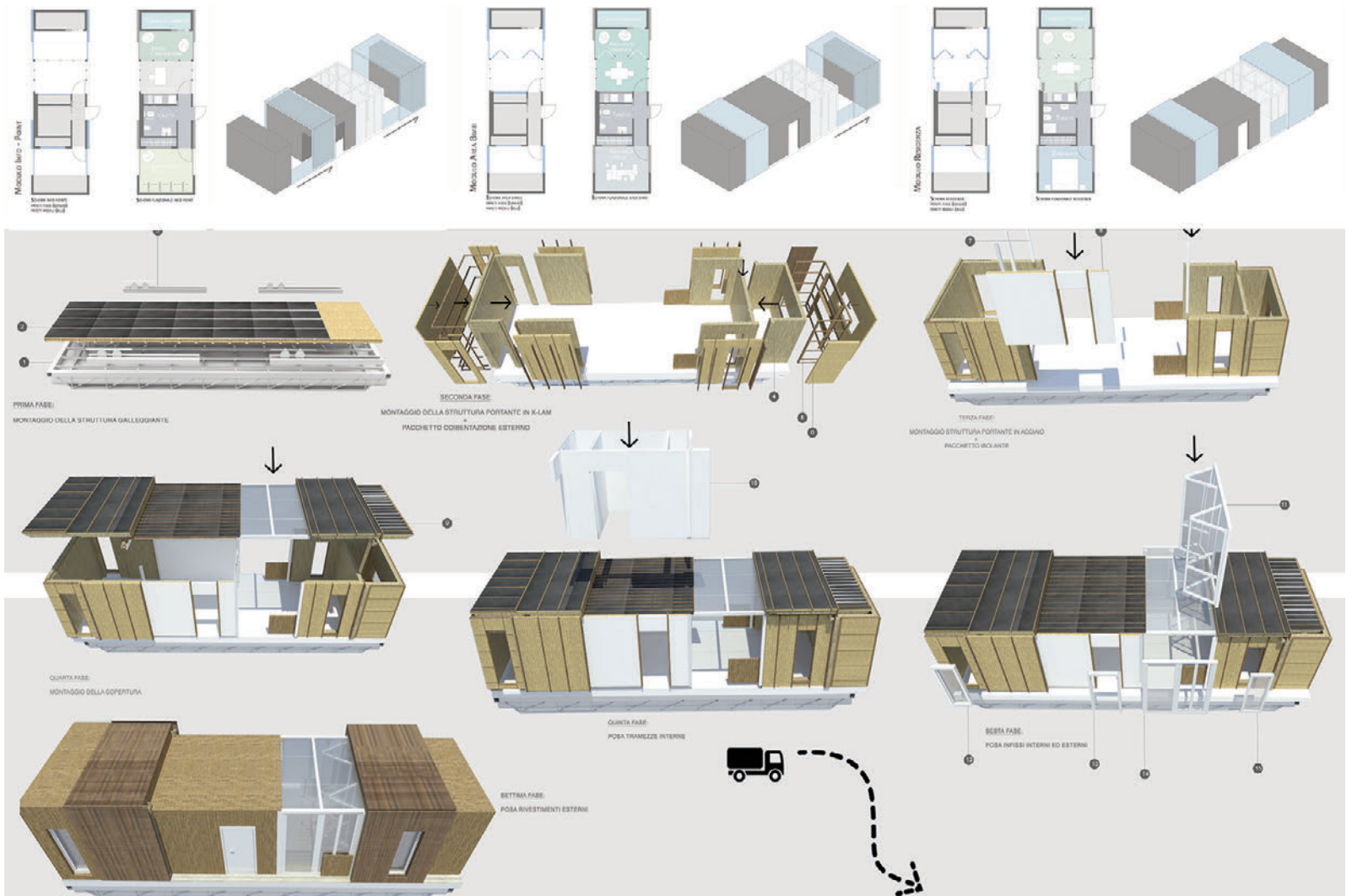


Fig. 15 | Design proposal for S/E module with different functions along the artificial channel that connects Milan to Pavia (credit: D. Besana, 2019).

With this in mind, reference is made, purely by way of example, to the Ven-To cycleway tourist route that connects Venice and Turin and that, along a unified route, crosses different landscape contexts intersecting with enogastronomic, architectural-touristic or landscape thematic routes, served by modular structures at a small scale conceived according to techniques and principles of reversibility, strongly identifiable and recognisable along the entire route but flexible for use requirements in respect of the territory (Fig. 9-11).

Similarly, it is possible to recall the tourist-religious route of the Via Francigena linking Rome to Canterbury along which, even with the inherent variations in the landscapes it traverses, building modules all conceived with a dry-construction system successfully generate in their composition a wide typological variation and an adequate response to different demanding frameworks: in the heterogeneity of the route, small-scale modular architectures respond to specific needs of use (refreshment, service, overnight, informational and religious spaces) by supporting control of the building process with a view to disassembly by parts and components and ensuring the reversibility of the place of settlement (Fig. 12).

As evidence of the number of case histories on which the same design methodology can be employed, lastly, it is possible to mention the routes and bicycle networks that can be created from

disused railway tracks, as in the case of the Ligurian Riviera (Fig. 13, 14) or from waterways, along rivers or canals. Despite their specificity, each route or network possesses similar characteristics in terms of design requirements, able to respond with small-scale architecture, a recognisable local element, to the specific functional needs of different places (Fig. 15). Minimal modular architecture thus offers a possible response to the enhancement of an area through an element of identity, albeit specific to different use destinations, with a view to sustainability and awareness toward the place in which it settles.

Conclusions | This paper has argued that architecture design, through technique and technology, can provide adequate (validated by research activities and experiments conducted in different fields) and innovative answers in terms of control and environmental impact by way of a small-scale modular approach, thanks to its characteristics of modularity, repeatability and versatility (functional and spatial) that guarantee high levels of performance and quality.

To achieve such a goal requires the implementation of new performance requirements that can be traced back to Reversible Building Design principles and strategies at all stages of the design process, particularly at the preliminary design stage since the late integration of reversibility can severely

ly affect the environmental, economic and social sustainability of the built environment. The project can, therefore, better respond to the needs of the context, society and territory in which it fits by expressing a quality of construction, language and architecture that is in service to the usability and enhancement of an area while maintaining its recognisable characteristics.

To date, an unresolved issue is the transposition of the module from small-scale design to more complex and extensive architecture in which to develop Reversible Building Design principles and strategies with equal attention. A particular line of research in this direction could precisely stem from the definition of performance requirements and parameters to be codified in general guidelines, testing their applicability to different contexts and at different scales.

Acknowledgements

The contribution, resulting from a common reflection, is to be assigned in equal parts to both Authors.

References

- Akinade, O. O., Lukumon, O. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., Bello, S. A., Jaiyeobac, B. E. and Kadiric, K. O. (2017), "Design for Deconstruction (DfD) – Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills", in *Waste Management*, vol. 60, pp. 3-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.017 [Accessed 30 October 2023].
- Arup (2016), *The Circular Economy in the Built Environment*. [Online] Available at: arup.com/perspectives/publications/research/section/circular-economy-in-the-built-environment [Accessed 30 October 2023].
- Balzani, M. and Di Giulio, R. (2021), *Architettura e sostenibilità – Innovazione e sperimentazione tra ambiente costruito e paesaggio*, Skira, Milano.
- Bazzana, M. (2009), *[Costruire] la Temporalità – Life Cycle Thinking come strumento di progettazione per habitat transitori*, PhD Thesis in Ingegneria edile / Architettura, XXIII ciclo, tutor Prof. M. Morandotti, co-tutor Prof. M. Lavagna, Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni e del Territorio, Università di Pavia.
- Besana, D. and Tirelli, D. (2022), "Reuse and retrofitting strategies for a Net Zero Carbon Building in Milan – An analytical evaluation", in *Sustainability*, vol. 14, issue 23, article 16115, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su142316115 [Accessed 30 October 2023].
- Bologna, R. (2002), *La reversibilità del costruire – L'abitazione transitoria in una prospettiva sostenibile*, Maggioni, Santarcangelo di Romagna, Rimini.
- Chou, J.-R. (2021), "A Scoping Review of Ontologies Relevant to Design Strategies in Response to the UN Sustainable Development Goals (SDGs)", in *Sustainability*, vol. 13, issue 18, article 10012, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su131810012 [Accessed 30 October 2023].
- Cucinella, M. (2022), "The University of tomorrow must arise from the long-last dialogue between the academic buildings, the territory and the community", in suppl. *Domus | Designing and regenerating spaces form knowledge*, vol. 1069, June 2022.
- Cucinella, M. (2019), "Creative Empathy", in D'Ottavi, S., Mangano, G., Procopio and Ulisse, A. (eds), *L'empatia creativa e la città*, Libria, Melzi, pp. 6-65. [Online] Available at: ricerca.unich.it/bitstream/11564/733259/1/EmpatiaCreativa%20-%20stampa%20-%20pagine%20singole-compressed.pdf [Accessed 30 October 2023].
- Durmisevic, E. (2019), *Circular economy in construction design strategies for reversible buildings*, BAMB, Netherlands. [Online] Available at: bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/05/Reversible-Building-Design-Strategies.pdf [Accessed 18 October 2021].
- Durmisevic, E. (2018), *WP3 – Reversible Building Design Guidelines*, BAMB. [Online] Available at: bamb2020.eu/wp-content/uploads/2018/12/Reversible-Building-Design-guidelines-and-protocol.pdf [Accessed 30 October 2023].
- Durmisevic, E. (2006), *Transformable building structures – Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction*, Cedris M&CC, Delft. [Online] Available at: repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A9d2406e5-0cce-4788-8ee0-c19cbf38ea9a [Accessed 30 October 2023].
- Ellen Mac Arthur Foundation (2013), *Towards the Circular Economy Vol. 1 – Economic and business rationale for an accelerated transition*. [Online] Available at: aquafil.com/assets/uploads/ellen-macarthur-foundation.pdf [Accessed 30 October 2023].
- European Commission (2021), *New European Bauhaus – Shaping more beautiful, sustainable and inclusive forms of living together*. [Online] Available at: new-european-bauhaus.europa.eu/index_en [Accessed 30 October 2023].
- European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee of the Regions – A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe*, document 52020DC0098, 98 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0098&qid=1699455418536 [Accessed 30 October 2023].
- European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN [Accessed 30 October 2023].
- European Parliament (2021), *Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law')*, document 32021R1119, PE/27/2021/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32021R1119 [Accessed 30 October 2023].
- Galle, W. and De Temmerman, N. (2013), "Multiple design approaches to transformable building – Construction typologies", in Bragança, L., Pinheiro, M. and Mateus, R. (eds), *Portugal SB13 – Contribution of Sustainable Building to meet EU 20-20-20 Targets, 30 October-1 November, Guimarães Portugal*, Universidade do Minho, Técnico Lisboa, iSB Portugal, pp. 783-790. [Online] Available at: repositum.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/37340/1/2108-Proceedings%20Portugal%20SB13.pdf [Accessed 30 October 2023].
- Gates, B. (2022), *How to Avoid a Climate Disaster – The Solutions We Have and the Breakthroughs We Need*, Penguin Book, London.
- Habraken, N. J. (1972), *Supports – An alternative to mass housing*, Architectural Press, London.
- IEA – International Energy Agency (2019), *Perspectives for the Clean Energy Transition – The Critical Role of the Buildings*. [Online] Available at: iea.blob.core.windows.net/assets/026bfff1b-821d-48bc-8a0e-7c10280c62bc/Perspectives_for_the_Clean_Energy_Transition_2019.pdf [Accessed 30 October 2023].
- Imperadori, M. (2008), *La progettazione con tecnologia stratificata a secco – Realizzazione innovative, linee guida e prodotti per una meccanica dell'architettura sostenibile*, Il Sole 24 Ore, Milano.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Changes (2021), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Summary for Policymakers*. [Online] Available at: ipcc.ch/report/ar6/wg1/ [Accessed 30 October 2023].
- Lauria, M. (2018), "La reversibilità del costruire – Esperimenti di progettazione esecutiva | Building reversibility – Executive design examples", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 3, pp. 63-70. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/392018 [Accessed 30 October 2023].
- Mario Cucinella Architects (2020), *Building Green Futures*, Forma Edizioni, Firenze.
- McDonough, W. and Braungart, M. (2003), *Cradle to Cradle – Remaking the Way We Make Things*, North Point Press, New York. [Online] Available at: cushman.host.dartmouth.edu/courses/engs44/Cradle-to-Cradle-Chapter1.pdf [Accessed 30 October 2023].
- Ness, D. (2021), "Dalla nuova edilizia alla rigenerazione – Può il Nuovo Bauhaus ridefinire l'architettura e dare risposte ai cambiamenti globali? | The shift from new build to regeneration – Can the New Bauhaus transform architecture and design to meet global challenges?", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 9, pp. 22-31. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/922021 [Accessed 11 October 2023].
- Nocca, F. (2017), "The Role of Cultural Heritage in Sustainable Development – Multidimensional Indicators as Decision-Making Tool", in *Sustainability*, vol. 9, issue 10, article 1882, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su9101882 [Accessed 30 October 2023].
- OECD – Organisation for Economic Cooperation and Development (2019), *Global Material Resources Outlook to 2060 – Economic drivers and environmental consequences*, OECD Publishing Paris. [Online] Available at: doi.org/10.1787/9789264307452-en [Accessed 30 October 2023].
- Park Associati and Bollinger + Grohmann (2021), *IN-LEGNO – Cambiare prospettiva per costruire il futuro*, Letteraventidue, Siracusa.
- Russo Ermolli, S. and Galluccio, G. (2019), "Industrializzazione Edilizia e Prefabbricazione tra Materialità e Immaterialità | Building Industrialization and Prefabrication between Materiality and Immateriality", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 93-100. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5102019 [Accessed 11 October 2023].
- Scalisi, F. and Ness, D. (2022), "Simbiosi tra vegetazione e costruito – Un approccio olistico, sistemico e multilivello | Symbiosis of greenery with built form – A holistic, systems, multi-level approach", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 26-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/112022 [Accessed 30 October 2023].
- Scalisi, F. and Sposito, C. (2021), "Strategie e approcci 'green' – Un contributo dall'off-site e dall'upcycling dei container marittimi dismessi | Green strategies and approaches – A contribution from the off-site and upcycling of discarded shipping containers", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 10, pp. 92-119. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1092021 [Accessed 11 October 2023].
- Silpa, K., Yao, L., Bhada-Tata, P. and Van Woerden, F. (2018), *What a Waste 2.0 – A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*, World Bank, Washington (DC). [Online] Available at: openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/92a50475-3878-5984-829e-0a09a6a9badc/content [Accessed 30 October 2023].
- SystemIQ and Club of Rome (2020), *A system change compass – Implementing the EU Green Deal in a time of recovery – Executive Summary – October 2020*. [Online] Available at: lebensraum.tirol/wp-content/uploads/2021/08/System-Change-Compass-executive-summary.pdf [Accessed 30 October 2023].
- Tirelli, D. and Besana, D. (2023), "Moving toward Net Zero Carbon Buildings to Face Global Warming – A Narrative Review", in *Buildings*, vol. 13, issue 3, article 684, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings13030684 [Accessed 30 October 2023].
- Tucci, F. (2017), "Paradigmi della Natura per progettare involucri architettonici | Nature's Paradigms for designing architectural envelopes", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 2, pp. 47-54. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/262017 [Accessed 11 October 2023].
- Tweed, C. and Sutherland, M. (2007), "Built cultural heritage and sustainable urban development", in *Landscape and Urban Planning*, vol. 83, issue 1, pp. 62-69. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.05.008 [Accessed 30 October 2023].
- UN – General Assembly (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 10 November 2021].
- UNEP – United Nations Environment (2020), *2020 Global Status Report for Buildings and Construction – Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. [Online] Available at: globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf [Accessed 30 October 2023].
- Wallance, D. (2021), *The Future of Modular Architecture*, Taylor & Francis.

ARTICLE INFO

Received	10 September 2023
Revised	18 October 2023
Accepted	30 October 2023
Published	31 December 2023

CAMBIAMENTI CLIMATICI NEI PAESAGGI DI BONIFICA

Adattamento tra modulo e modularità

CLIMATE CHANGE IN RECLAMATION LANDSCAPES

Adaptation between module and modularity

Carla Brisotto, Jeff Carney, Ina Macaione, Alessandro Raffa

ABSTRACT

I paesaggi moderni sorti dalla bonifica delle aree umide, espressione di uno sguardo produttivista dello spazio naturale, sono il risultato di profonde trasformazioni dell'ambiente per ragioni economiche, sociali, sanitarie e culturali. Progettati come macchine territoriali concluse e autosufficienti, oggi si confrontano con gli effetti del cambiamento climatico che richiederanno profonde trasformazioni e definiranno nuove ecologie e nuove estetiche. Attraverso il confronto, sino ad oggi inesplorato, tra i paesaggi di bonifica delle Everglades, Florida (US) e di Metaponto, Basilicata (Italia), il contributo riflette su limiti e possibilità del progetto di adattamento attraverso i concetti di modulo e modularità. Emergeranno temi e questioni che orienteranno in futuro una sperimentazione metodologico-operativa per l'adattamento al cambiamento climatico nei paesaggi moderni di bonifica.

Modern drainage of wetlands has produced landscapes that are expressions of a productive view of natural space. These landscapes result from a profound environmental transformation driven by economic, social, health, and cultural reasons. Today, these autonomous territorial machines face the effects of climate change, a challenge that will require significant changes and a paradigm shift leading to new ecologies and aesthetics. Through an unexplored comparison of reclamation landscapes between the Everglades, Florida (US) and Metaponto, Basilicata (Italy), this contribution reflects on the limits and possibilities of adaptation through the concepts of module and modularity. The emerging themes will inform future methodological and operational experimentations for adapting modern reclamation landscapes to climate change.

KEYWORDS

paesaggi di bonifica, cambiamento climatico, modulo, modularità, progetto

reclamation landscapes, climate change, module, modularity, design

Carla Brisotto, Architect and PhD, is an Assistant Director at the Florida Institute for Built Environment Resilience (FIBER), an Assistant Scholar at the School of Architecture, University of Florida (USA), and a member of the Florida Resilient Cities Lab. Her research focuses on the intersection between urban settlements and agricultural ecosystems. E-mail: c.brisotto@ufl.edu

Jeff Carney, Architect, Urban Planner, and MCP, is an Associate Professor at the School of Architecture at the University of Florida (USA) and the Director of the Florida Institute for Built Environment Resilience (FIBER). He specializes in the urban design of housing systems with particular attention to adaptation to climate change. E-mail: j.carney@ufl.edu

Ina Macaione, Architect, is an Associate Professor at the Department of European and Mediterranean Cultures (DiCEM) of the University of Basilicata (Italy). She carries out research in urban regeneration, landscape and public space design. E-mail: ina.macaione@unibas.it

Alessandro Raffa, Architect and PhD, is an Assistant Professor PON R&I – FSE REACT-EU at the Department of European and Mediterranean Cultures (DiCEM) of the University of Basilicata (Italy). He is currently a Fulbright Visiting Scholar at FIBER, University of Florida, conducting research activities within nature-based urban design for climate adaptation. E-mail: alessandro.raffa@unibas.it



I paesaggi moderni sorti dalla bonifica delle paludi, espressione di uno sguardo produttivista dello spazio naturale, sono il risultato di profonde trasformazioni dell'ambiente per ragioni economiche, sociali, sanitarie e culturali che si sono tradotti nella sostituzione degli ecosistemi preesistenti. Espressione del controllo dell'uomo sulla natura, i progetti di bonifica hanno ridefinito il rapporto tra terra e acqua all'insegna della separazione, riconfigurando, o più spesso cancellando, le dinamiche socio-ecologiche trovate. La natura della palude, percepita come spazio incerto, rischioso e improduttivo, doveva essere normalizzata, riorganizzata, 'rigenerata'; ciò si è tradotto spesso nella realizzazione di articolati progetti di rifondazione territoriale caratterizzati da un disegno geometrico, in cui la rimisurazione dello spazio rispondeva, da un punto di vista produttivo, all'efficienza dei meccanismi di sfruttamento delle risorse naturali e, da un punto di vista culturale, esprimeva il controllo dell'uomo sullo spazio naturale.

I paesaggi moderni di bonifica hanno trasformato le zone umide in macchine territoriali autosufficienti nelle quali le reti infrastrutturali, i dispositivi spaziali tecno-naturali, i pattern di coltivazione e le logiche insediative hanno affermato la propria alterità sia rispetto alla natura anfibia preesistente sia rispetto al contesto a cui appartenevano. La modularità delle aree umide precedenti alla bonifica – derivante dalla loro dimensione anfibia ed ecotonale intesa, in senso ecologico, come capacità di riorganizzazione resiliente (Kharrazi et alii, 2020) in caso di eventi calamitosi e parte della resilienza socio-ecologica di un luogo (Walker and Salt, 2012) – è stata sostituita da una matrice modulare alternativa e segregativa, che li ha resi particolarmente fragili ai cambiamenti socio-ecologici e climatici. La sostituzione degli habitat palustri è stato un fenomeno, pur nelle specificità dei singoli contesti, di rilevanza globale (Fluet-Chouinard et alii, 2023) con asimmetrie temporali e geografiche: si stima che a livello mondiale la perdita di aree umide dal XVIII secolo ad oggi si aggiri intorno all'87%, con una notevole accelerazione a partire dal XIX secolo in cui circa il 70% delle paludi è stato convertito a usi agricoli e insediativi (Davidson, 2014).

La Convenzione di Ramsar (UNESCO, 1971), riconoscendo l'importanza globale di preservare quelle che, con un cambio semantico, verranno definite wetlands e non più paludi, ha cercato di porre un argine a tale processo di sostituzione, riconoscendo alla molteplicità di ecosistemi anfibi un ruolo cruciale per la conservazione della biodiversità, di regolazione del ciclo dell'acqua, e più recentemente, di mitigazione e adattamento agli effetti del cambiamento climatico.

I paesaggi moderni di bonifica oggi dovranno essere gestiti in modo innovativo per affrontare le sfide dello sviluppo sostenibile e le incertezze della contemporaneità, tra cui gli effetti del cambiamento climatico, che renderanno inevitabili trasformazioni significative e persino strutturali. Proprio gli effetti presenti o previsti del cambiamento climatico sui paesaggi moderni di bonifica, sia costieri che interni, rimetteranno in discussione il rapporto segregativo tra terra e acqua, tra naturale e culturale, umano e non umano, tra esigenze produttive e tutela della biodiversità, riconfigurando anche la matrice modulare. Per affrontare tale sfida urge una riflessione sul progetto multi-scalare del territorio non più solo come strumento di controllo

a fini produttivi e sanitari, ma anche come strumento di visione in grado di sintetizzare la complessità delle soluzioni da un punto di vista ecologico, sociale e culturale.

In tal senso, il modulo, matrice disegnata di questi paesaggi moderni, deve essere letto come possibile chiave di interpretazione contemporanea delle loro fragilità e punto di partenza per una sua transizione verso forme di modularità possibili, a partire da un diverso rapporto con la natura mediato dai concetti operativi di Green and Blue Infrastructure e Nature-based Solutions (NbS). Dopo la modularità – intesa come attributo della resilienza socio-ecologica di un sistema – propria delle aree umide sostituite dal modulo produttivo della bonifica, quali le forme di modularità che potranno esprimersi in futuro per supportare processi di adattamento al cambiamento climatico?

Questi paesaggi, quindi, si offrono come spazio di riflessione e di sperimentazione di nuovi approcci e metodologie operative integrate, di strategie e azioni in cui, attraverso il progetto per l'adattamento, definire nuove ecologie e nuove estetiche. In questa prospettiva, si colloca il presente contributo che, attraverso una metodologia qualitativo-comparativa, intende far emergere questioni e temi rilevanti a partire dal confronto, sino ad ora inesplorato, tra due paesaggi moderni di bonifica: le Everglades in Florida (US) e la Piana di Metaponto nell'Italia meridionale.

Il contributo è articolato in sei sezioni. Nella prima gli autori riportano lo stato della letteratura, tra riflessioni critiche e sperimentazioni progettuali; nella seconda si presentano i limiti teorico-critici e metodologico-operativi degli approcci correnti. La terza sezione descrive il metodo adottato dagli autori per lo studio condotto che viene descritto nella quarta e quinta sezione. Il contributo conclude con una riflessione finale che apre verso nuove possibilità operative per l'adattamento al cambiamento climatico dei paesaggi moderni di bonifica.

Il dibattito e le sperimentazioni progettuali |

Dall'analisi della letteratura emerge come la condizione anfibia originaria, insieme all'accresciuta sensibilità globale verso le aree umide, e il loro potenziale rispetto al tema del cambiamento climatico, della mitigazione e adattamento ai suoi effetti, spingano i paesaggi della bonifica verso trasformazioni che prevedono come prioritaria la loro rinaturalizzazione e il ripristino della loro dimensione umida (Temminck et alii, 2023). La re-integrazione dell'elemento acqua e i processi assistiti di rinaturalizzazione in questi paesaggi intendono rispondere a problematiche ecologiche come la perdita di biodiversità derivante dalla produzione agricola di carattere industriale, a ridurre gli effetti della produzione stessa sulla qualità dell'ambiente (Cataldo et alii, 2014; Marshall, Pielke and Steyaert, 2003) e quelli del cambiamento climatico (Ojanen and Minkinen, 2020; Baptist et alii, 2019; Ingebritsen et alii, 1999), secondo scale e temporalità variabili; anche il rapporto tra attività agricola e acqua viene riscritto, in chiave rigenerativa e di riduzione degli impatti, attraverso l'introduzione di pratiche alternative (Pakalne et alii, 2021; Baldwin, 2020).

Nuovi ecosistemi umidi attraversano anche gli spazi urbani, come nel caso della proposta dello studio Balmori Associates per l'Underline¹ a Mia-

mi (2015), in cui il tema del riuso degli spazi sottostanti a un viadotto diventa luogo di nuove relazioni uomo-natura nell'urbano (González-Campaña, Lafaurie-Debany and Rabazo Martin, 2023): la sequenza lineare di ecosistemi urbani alludono a quelli che un tempo era possibile incontrare in continuità tra le Everglades e la costa che il progetto dell'Underline intende riconnettere.

Le ragioni di carattere ecologico, di mitigazione e adattamento al cambiamento climatico vedono sorgere 'nuove nature' (Renes, 2018) che, in una sempre più spinta polarizzazione del dibattito, sembrano apparire come unica possibile alternativa alle catastrofi dell'Antropocene; rinaturalizzazioni che spesso generano livelli di conflittualità molteplici, tra posizioni culturali e interessi particolari, soprattutto in quei contesti, più o meno storicizzati, in cui il modulo dell'infrastrutturazione agricola è elemento morfologico identitario. Si tratta di interventi spesso indifferenti alle forme tecno-naturali trovate, espressione della matrice modulare della bonifica, e al palinsesto cui appartengono (Corboz, 1998), con esiti omologanti dal punto di vista del progetto e del processo. Se per un verso la letteratura si concentra sul ruolo dei processi e delle pratiche di rinaturalizzazione per rispondere a problemi o contesti specifici, dall'altra le esplorazioni riguardanti paesaggi moderni di bonifica e cambiamento climatico dal punto di vista delle discipline del progetto restituiscono un quadro frammentario di esperienze 'basate sul paesaggio' da cui emerge come prevalente una tendenza omologante, orientata verso operazioni di ripristino dell'habitat selvatico e umido.

A partire da una ricognizione di esperienze e pratiche rilette attraverso gli intrecci molteplici tra modulo di bonifica e modularità esprimibile in prospettiva di adattamento al cambiamento climatico, il presente studio ha ampliato lo sguardo anche a esperienze che, anche se non in maniera esplicita, adottano strategie e azioni che delineano approcci rilevanti e che hanno informato l'analisi e il confronto dei casi studio. Di seguito saranno brevemente descritte due sperimentazioni progettuali condotte in contesti di bonifica in cui la riflessione sul modulo trovato diventa occasione per aprire verso forme di modularità possibile, con effetti sulla resilienza socio-ecologica dei singoli contesti.

Un approccio significativo è quello che ha portato lo studio OMA / Rem Koolhaas all'elaborazione del progetto per Haarlemmermeerpolder (1986). Qui lo studio olandese si interroga sulla futura dimensione urbana di un polder a partire dalla sua struttura modulare che viene riconosciuta come elemento ordinatore e stabile, ma anche come articolazione di una molteplicità di possibilità d'uso. OMA proietta l'armatura agricola del suolo del polder, residuo di una cultura secolare di adattamento reciproco tra società e ambiente (van Bergeijk and Piccinini, 2022), in una nuova dimensione urbana, in cui passato e futuro dialogano nel presente, attraverso la giustapposizione di architetture, elementi, usi che intrattengono relazioni diverse con il modulo di bonifica: l'obiettivo è stabilire unità e coerenza senza sradicare differenze e incongruenze (Van Gerrewey, 2015). La trama dell'infrastrutturazione agricola del polder diventa occasione per sperimentare configurazioni urbane molteplici: densificazioni edilizie e grandi infrastrutture urbane si confrontano con spazi pubblici ver-

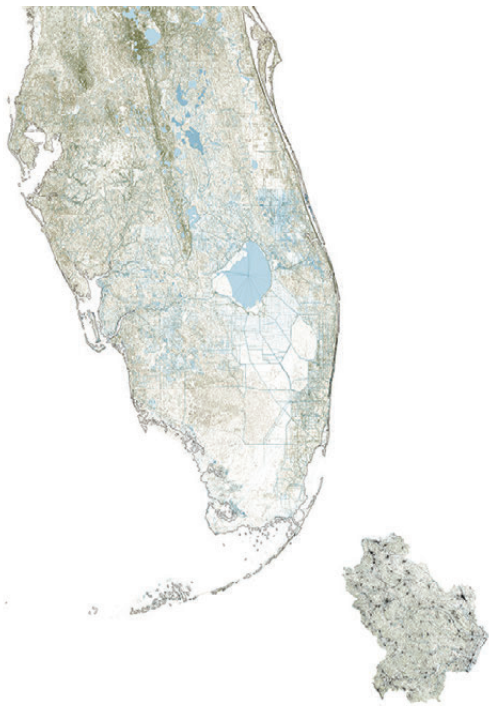


Fig. 1 | Modern Reclamation Landscapes: scalar comparison between Everglades and Metaponto Plain (credit: the Authors; sources: UF Geoplan Center-Florida Geographic Data Library and RSDI Basilicata, 2023).

di, per l'agricoltura e per attività ricreative, ma anche con aree boscate e un ambito ad allagamento controllato dove vengono inseriti spazi per l'allevamento ittico e la rinaturalizzazione.

Un'altra esperienza significativa, seppur a una scala diversa, riguarda il progetto di P-RexLab / Alan Berger nel paesaggio di bonifica dell'Agro Pontino. Qui Berger applica il suo approccio Systemic Design (Berger, 2009), concentrandosi soprattutto sull'infrastruttura idrica, le sue misure e i pattern di inquinamento. A partire da letture multi-scalari, Berger e il suo team propongono la sperimentazione progettuale chiamata Wetland Machine, «[...] a 2 sq km constructed wetland park [...] that would both provide a recreational landscape [...] and remove pollutants»². Il progetto ecologico-paesaggistico di Berger, sebbene non realizzato, introduce un nuovo modo di pensare attraverso un processo integrato e olistico di bonifica sistemica, per migliorare la qualità dell'acqua e il potenziale di ricarica delle falde acquifere, aumentare la biodiversità e fornire spazi ricreativi (Berger et alii, 2010).

La progettazione di una nuova topografia e di ecologie anfibie e l'implementazione di NbS non sono guidate dall'intenzione di ripristinare localmente l'ecosistema umido precedente alla bonifica, ma di ridisegnarlo secondo gli attuali modelli di fragilità ambientale, economica e sociale, riconoscendo l'identità altamente infrastrutturata delle Paludi Pontine. La struttura modulare che caratterizza la bonifica dell'Agro viene introiettata sia sul piano concettuale, come espressione tangibile della sua dimensione di macchina territoriale, sia da un punto di vista progettuale attraverso la reiterazione di strutture modulari per la purificazione delle acque.

Il progetto 'cum Natura': integrare spazio, scienza e umanità oltre i limiti attuali | Le ragioni eco-

logico-politiche alla base delle scelte per affrontare la sfida climatica spingono verso la rinaturalizzazione degli ambiti di bonifica e anche nel dibattito disciplinare, così come nelle sperimentazioni progettuali, il ripristino degli ecosistemi, delle dinamiche naturali, della biodiversità, orienta verso una loro riconversione ecologica in aree umide. Questo approccio, che attualmente è prevalente, mostra una serie di limiti. Da un punto di vista teorico, non tiene in considerazione che la natura, così come anche il clima, sono un prodotto della cultura, di un tempo e di un contesto specifico, e in questo la traslazione semantica tra palude e area umida è un esempio. Questa riflessione ha anche un carattere operativo nella misura in cui l'idea di natura sottesa all'approccio oggi dominante contribuisce alla diffusione di soluzioni omogeneizzanti che non considerano la diversità bioculturale dei singoli contesti la quale, nei paesaggi di bonifica, è espressa spazialmente dal modulo e dai suoi 'materiali'.

Da un punto di vista critico l'adattamento al cambiamento climatico in questi contesti, da un lato per la scarsità di studi in tal senso, dall'altro per l'omologazione degli approcci, spesso non sembra farsi carico della complessità che nel tempo ha contribuito a ridefinirli, così come non sembra guardare al modulo di bonifica e alla modularità che potrebbe esprimere nell'adattamento. Da un punto di vista metodologico-operativo le limitazioni teorico-critiche sopra descritte, così come le sperimentazioni condotte, denunciano la necessità di ridefinire gli approcci consolidati. I due esempi citati mostrano come sia possibile pensare alla trasformazione dei contesti di bonifica in maniera complessa e lontano da sterili polarizzazioni, confrontandosi con la dimensione ecologica, sociale e culturale attraverso un approccio integrato. Tuttavia il tema dell'adattamento al cambiamento climatico richiede una riflessione ulteriore sui futuri possibili di questi paesaggi, specialmente se si considera la netta prevalenza di approcci tecnico-scientifici che, seppur indispensabili, non tengono conto dell'aspetto socio-culturale e spaziale, che invece è essenziale per poter comprendere il concetto di natura all'interno del suo contesto.

Pertanto per superare tali limitazioni si dovrebbero sviluppare nuove metodologie operative, ma anche strumenti che possano aprire traiettorie di progetto per l'adattamento che superino le divisioni tra culturale e naturale, umano e non umano, materiale e immateriale e aprano verso logiche di lavoro collaborativo, multidisciplinare, multi-scalare e multi-temporale (Davidová, Barath and Dickinson, 2023).

Metodologia | A partire dai gap emersi nella letteratura e dai limiti riscontrati negli approcci attuali al tema, il contributo intende, attraverso una metodologia di carattere qualitativo-comparativa, introdurre un modo diverso di guardare al progetto per l'adattamento al cambiamento climatico in questi contesti, tra modulo della bonifica e modularità possibili. Il contributo opera quindi un confronto tra il paesaggio moderno di bonifica delle Everglades e della Piana di Metaponto, al fine di far emergere analogie e differenze tra due processi di trasformazione appartenenti allo stesso periodo storico ma espressione di diversi contesti politico-culturali.

I due casi studio sono particolarmente emblematici per poter osservare la riorganizzazione ecologica e ri-modulazione degli ambiti di bonifica, tra impatti e forme di fragilità endogene che gli effetti del cambiamento climatico contribuiscono a esacerbare. Inoltre, rispetto alla questione climatica, il confronto consentirà in futuro di informare il processo di adattamento del caso italiano rispetto agli scenari di tropicalizzazione climatica prevista dell'area mediterranea.

A partire da questo confronto, il contributo intende attivare una riflessione sul futuro dei paesaggi moderni sorti dalla bonifica di aree umide, sollevando questioni e individuando temi chiave al fine di costruire, in un prossimo futuro, una metodologia operativa e individuare strategie e azioni che si confrontino con la complessità dei contesti presi in esame – così come per altri ad essi analoghi – per comprendere quali forme di modularità potranno esprimersi attraverso il progetto complesso, multi-scalare e multi-temporale per l'adattamento resiliente al cambiamento climatico.

Due paesaggi di bonifica emblematici: Everglades e Metaponto

Il caso della Everglades Agricultural Area (EAA) rappresenta emblematicamente il processo di sviluppo di uno Stato, la Florida, destinato a diventare uno dei più popolati degli Stati Uniti. Le bonifiche attuate in questa porzione di aree umide cominciate già nell'Ottocento, e sviluppatasi a fini agricoli nei primi anni del Novecento, si sono intensificate nel momento in cui, grazie all'avvento dell'aria condizionata alla fine degli anni Quaranta, nuovi residenti si sono insediati nei territori più a sud. Spinte da una logica non troppo lontana da quella dei polder olandesi, le politiche di bonifica hanno 'costruito' migliaia di kmq di terreno coltivabile attraverso una fitta rete di canali che ha alterato il naturale flusso dell'acqua a scala regionale, per poter produrre cibo non solo per i nuovi residenti i quali erano principalmente forza lavoro, ma per tutti gli Stati Uniti.

Questa politica 'produttivista', che rispondeva a necessità quasi ataviche, ha trasformato per sempre quello che fino ad allora era chiamato in maniera estremamente evocativa il Fiume d'Erba, alludendo a una dimensione fluida e mutevole tra acqua e vegetazione: da ecosistema riconosciuto per il suo valore ecologico e culturale dalle popolazioni indigene a territorio prettamente produttivo, da luogo che poteva svolgere molteplici funzioni e assumere diversi significati a territorio dedicato esclusivamente a una sola funzione. La storia ha dimostrato che il clima, ancor prima dei cambiamenti più recenti, aveva reclamato quelle terre durante due dei più catastrofici uragani nel 1926 e nel 1928, distruggendo raccolti e uccidendo residenti, specialmente tra i più poveri. Oggi l'Everglades Agricultural Area non solo ha visto l'abbandono di molti dei suoi insediamenti e l'aumento dell'inquinamento legato all'attività agricola, ma vede anche assottigliarsi lo strato organico di suolo con il conseguente cedimento dei terreni ancor più soggetti ad allagamenti e infiltrazioni saline.

Il caso italiano della Piana di Metaponto è espressione di una bonifica moderna che ha sovrascritto un palinsesto diversamente affiorante di tracce di cicli di bonifica e re-impaludamento iniziato con la colonizzazione greca. Dalla zona costiera e dalla sua pianura alluvionale fino ai bacini idrografici che si spingono nell'interno, il suo

modulo è espressione di questa stratificazione che ha dato forma a un paesaggio agrario che oggi viene riconosciuto di interesse culturale. Nel contesto italiano la Piana di Metaponto è un caso rilevante di paesaggio di bonifica stratificato tra litorale e aree interne, dove lo sviluppo turistico e quello agricolo – oggi di rilevanza nazionale – si scontra con gli scenari di innalzamento del mare previsti a fronte di livelli di erosione costiera considerevoli. La Piana di Metaponto è emblematica non solo per la sua peculiare stratificazione storica, ma anche per le forme di fragilità e vulnerabilità socio-ecologiche che la bonifica del Novecento insieme agli sviluppi successivi hanno determinato e che gli effetti futuri del cambiamento climatico, in assenza di strategie e azioni di adattamento, contribuiranno ad accrescere.

Confronto tra Everglades Agricultural Area e Piana di Metaponto: da modulo a modularità

I casi studio sono stati intenzionalmente selezionati per la loro diversità geografica, scalare (Fig. 1), culturale, sociale ed ecologica, ma rivelano assonanze su approcci al progetto moderno di trasformazione della palude. Il confronto è stato condotto attraverso l'individuazione di categorie interpretative per riflettere sulle specifiche declinazioni del concetto di modulo, evidenziando impatti e fragilità e identificando processi in corso, per infine definire strategie di adattamento climatico attraverso forme di modularità (Tabb. 1, 2). In entrambi i casi lo spazio naturale della palude è completamente riorganizzato, così come le sue dinamiche ecologiche. Nella Piana di Metaponto la natura selvaggia dei luoghi viene quasi completamente sostituita dal paesaggio della Bonifica Integrale, prima, e della Riforma Agraria del Dopoguerra poi (Figg. 2, 3), un paesaggio coltivato, infrastrutturato, abitato, per certi versi un 'paesaggio moderno di colonizzazione' solcato da canali, strade filari-interpoderali e campi e case coloniche che lo rimisurano (Figg. 4-6).

Nel caso americano lo spazio naturale viene riorganizzato attraverso una logica zonizzante che compartimenta le Everglades da un punto idrologico e topografico attraverso un complesso sistema idrico che muta l'intero flusso delle acque su scala regionale (Figg. 7, 8). La natura selvaggia della palude, quindi, viene mantenuta secondo un criterio areale, a meno della sua funzionalità ecologica originaria. Il suolo fertile a ridosso del lago Okeechobee, l'EEA (Fig. 9), viene infrastrutturato da una griglia territoriale fatta di percorsi e canali che punta alla massima efficienza del sistema produttivo agricolo di carattere industriale (Figg. 10-13). Proprio l'approccio antropocentrico e segregativo tra terra e acqua che ha dato forma a questi paesaggi necessita un ripensamento in una prospettiva sistemica (Walker and Salt, 2006) per aprire verso scenari di adattamento alle sfide di un clima che cambia: la correlazione tra terra e acqua espressa dal modulo dovrà confrontarsi con una maggiore complessità e attivare una dinamica circolare piuttosto che verticale.

Guardare ai paesaggi di bonifica, e al loro modulo, attraverso il concetto di modularità significa interrogarsi sulle possibilità del progetto multi-scalare di migliorare la loro resilienza socio-ecologica tanto agli shock quanto all'accumulazione di tanti piccoli eventi nel tempo. Paesaggi caratterizzati da modularità, intesa come attributo della resilien-

za, sono diversi in senso funzionale, culturale ed estetico, offrono servizi ecosistemici diversificati e sono più facilmente adattabili ai cambiamenti e flessibili, consentendo una gestione adattativa nel lungo termine. Guardare ai paesaggi di bonifica, alla loro matrice modulare e alle loro figure, in questa prospettiva, significa comprendere le forme di modularità esprimibili, le strategie e le azioni che potranno essere messe in campo nel medio-lungo termine, implementando soluzioni tecno-naturali dal valore spaziale che sappiano tradurre in un futuro incerto l'identità di questi paesaggi. Sulla base di questa riflessione tre sono le dimensioni su cui la costruzione metodologico-operativa dovrebbe fondarsi: la dimensione della performatività ecologica, della produzione e del processo.

La dimensione performativa guarda alle infrastrutture, sia idrauliche sia di mobilità, attraverso la lente del paradigma ecologico. In tal senso entrambe queste strutture, che impongono un disegno del territorio basato sul controllo e sull'efficienza, dovranno diventare flessibili, multifunzionali e aperte attraverso l'implementazione di soluzioni basate sulla natura. Le soluzioni da adottare non scelgono la rinaturalizzazione come un a priori, ma rispetto alle necessità presenti o possibili di adattamento che sarà l'ascolto del luogo e di chi lo abita e i modelli climatici a suggerire. In questo modo bisognerà guardare alle forme di rinaturalizzazione non come una strategia imposta dall'alto ma come una possibilità da integrare nel contesto attraverso lo sguardo multi-scalare che il tema ecologico rende necessario.

La dimensione produttiva richiede di guardare allo spazio agricolo in chiave sostenibile e rigenerativa delle risorse, ripensandone i modelli e mettendoli in relazione con le evoluzioni climatiche previste, all'interno di un più complesso quadro di dinamiche ecologiche presenti e future. Significa, cioè, ripensare in prospettiva pratiche colturali più adattabili rispetto alle condizioni climatiche e ai loro effetti. I campi definiti dal modulo diventano spazi dove sperimentare nuove forme di convivenza tra umano e non umano, acqua e terra, tecniche tradizionali e altre pratiche colturali: un esempio possibile riguarda la paludicoltura come pratica di 'rewetting' alternativa a quelle su suolo asciutto, che offre una serie di benefici: migliora la qualità del suolo e dell'acqua, riduce i fenomeni di subsidenza e l'emissione di CO₂ e ha impatti positivi sulla biodiversità. Come conseguenza il disegno dello spazio agricolo accoglierà una nuova complessità, anche in relazione alla dimensione performativa.

La dimensione processuale è fondamentale nella trasformazione da modulo a modularità, in quanto sposta l'attenzione dall'esito finale, come nel modulo, al processo da intraprendere verso la modularità e il miglioramento della resilienza climatica. Il processo diventa indispensabile se si vogliono organizzare le diverse dimensioni (performativa e produttiva) a seconda dello specifico palinsesto, una pratica a tutt'oggi piuttosto marginale rispetto a pratiche di omologante rinaturalizzazione. La Piana di Metaponto, da questo punto di vista, è un caso emblematico: i moduli di bonifica, a partire dal VII secolo a.C., insieme all'avanzare e al retrocedere della palude, sono stati differenzialmente sovrascritti e hanno orientato il disegno del suo paesaggio moderno. Un'interpretazione delle variazioni del modulo rispetto anche

alle diverse condizioni socio-economiche-ecologiche e climatiche che si sono susseguite potrebbe informare possibili strategie di adattamento secondo un approccio multi-temporale e multi-scalare. Questo tema riguarda, anche se in maniera meno evidente, anche le Everglades dove la nuova infrastrutturazione tecno-naturale in chiave di adattamento al cambiamento climatico prevederà l'implementazione di soluzioni che potrebbero intersecare le tracce, seppur labili, della cultura nativa espressione di modulo diverso, dove la reiterazione degli elementi agisce in maniera discreta e con un diverso rapporto con l'ambiente. Il palinsesto, quindi, dovrà integrare le dimensioni performativa e produttiva con quelle culturale e sociale; diventa perciò indispensabile considerare all'interno del processo tutti gli stakeholders (Amministrazioni Pubbliche, associazioni di agricoltori, cittadini, etc.) che hanno un ruolo nella gestione e modificazione del territorio e dei luoghi (Brisotto and Carney, 2022).

Conclusioni: verso una metodologia operativa

Il confronto condotto tra i due territori selezionati ha permesso di ragionare su temi e problemi che potrebbero in futuro orientare strategie e azioni per il progetto di adattamento nei paesaggi di bonifica di Metaponto e delle Everglades, a partire dai concetti di modulo e modularità, ma anche per altri paesaggi di bonifica analoghi. La sfida che il cambiamento climatico pone a questi contesti, rispetto alle logiche di funzionamento, alle dinamiche socio-ecologiche e ai modi di abitare sottese al loro modulo, richiede una riflessione sulle possibilità operative che il concetto di modularità, con le sue espressioni spaziali, potrebbe aprire per questi contesti e, più in generale, su metodologie e strumenti a partire dai quali esplorare traiettorie di progetto possibili.

Come si è evinto dal confronto tra i casi studio, un approccio progettuale a questi contesti non può prescindere dal confrontarsi con la complessità della loro natura, attraverso un sguardo olistico, integrato e multidisciplinare in cui l'incertezza che il cambiamento climatico porta con sé diventa occasione per ripensare il concetto di modulo secondo un principio di modularità.

Ciò significa approfondire gli intrecci complessi tra dimensione ecologica, sociale, economica, politica e culturale e scenari climatici possibili, elaborando, attraverso future sperimentazioni di research-driven design sui due casi selezionati, ma anche su altri ad essi analoghi che in futuro potrebbero rivelarsi di interesse, una costruzione metodologico-operativa che permetta di guardare ai paesaggi di bonifica come spazi per una 'eco-imaginative landscape architecture' (Comer, 1997) nei quali, all'interno di una strategia multi-scalare basata su scenari climatici, sia possibile adottare soluzioni alla scala locale in grado di migliorare la capacità di adattamento resiliente ma anche la qualità dei luoghi nel tempo, coinvolgendo le persone che li abitano. Non si potrà prescindere da un metodo inteso come processo / progetto ispirato dal concetto di opera aperta (Eco, 1962) e fondato sui concetti di pensiero complesso (Morin, 2000) e trans-disciplinarietà (Nicolescu, 2002), che assuma un criterio molteplice – ad esempio quello di modulo e modularità che ha guidato nella comparazione tra i due casi studio – nella lettura, interpretazione e comprensione fenomenolo-

Everglades	Modern Reclamation Goals	Results on the Reclaimed landscape (Module)	Impacts and Fragilities	Ongoing Process	Climate Adaptation (Modularity)
Hydrological infrastructure	Change of natural inland water flow (Ingebritsen et alii, 1999)	Control of Everglades blue infrastructure and gray infrastructure: drainage canals, dams, levees and control structures	Alteration of water quality, depths and hydroperiods Salt water intrusion Subsidence in drained lands (Richardson, 2008)	Implementation of renaturation and rewetting projects (i.e. Kissimmee River ecological restoration) Water Conservation Areas – WCA (Sklar et alii, 2005)	Long-term techno-natural restoration of hydrologic flow and ecological connectivity Flexible hydro-ways and controlled floodable landscapes
Mobility infrastructure	Creating a modern infrastructural system for agricultural production	Beside a system of state infrastructure, like Florida East Coast Railroad (1885), Tamiami Trail (1928), a small-scale grid of agricultural roads defines the agricultural module	Water pollution Noise pollution Interruption of ecological connectivity	Asymmetries between mobility and ecological restoration projects Enhancement of no motorized transportation for tourism inside parks	Design infrastructure for enhancing ecological connectivity, through hybrid-green solutions (i.e. bridges, tunnels, etc.) Enhancing alternative mobility
Agricultural pattern	After draining the soil, a reclamation pattern has been established for maximizing resource-intensive agricultural production	A 800x800 m grid structure defined by rural path and channels differently arranged and crossed by major water infrastructures	67% water pollution from agricultural runoff Accumulation of agricultural chemicals in soil Peat soil thinning Subsidence of agricultural area Estimated reduction in agricultural activity in the near future Water level higher than farmland level (Central and Southern Florida Project EAA Storage Reservoirs, 2005)	Construction of Stormwater Treatment Areas (STA) for agriculture inside the rural grid and Equalization Basin	Enhance biodiversity and variety of crop fields, also through the implementation of small-scale phytoremediation technique and new forms of water-tolerant agriculture that accumulate peat Crop patterns created by ecosystems and geological conditions rather than mechanical functionality
Community and settlement infrastructure	Displacement and segregation of the native communities Small rural towns along the lake shores Industrial farming inside the EAA Indian reservation at the edge of the EAA	Community of productivity rather than multifunctional Settlement grid structure along the radius channels and canals Lack of settlement density across EAA	Social inequalities to risk and disaster especially among African-American farming communities 23% water pollution from urban runoff and water waste No protection to Hurricanes Rural settlement abandonment and impoverishment	N/A	Enhance public space quality, housing quality, and wellbeing through NBS-based placemaking at an urban scale Improve participatory design processes

Tab. 1 | Between Module and Modularity: Everglades Agricultural Area – EAA (credit: C. Brisotto and A. Raffa, 2023).

gica del reale e dei suoi intrecci dinamici (Ingold, 2008). Un processo che, pur riconoscendo la dimensione sintetica del progetto, intende programmaticamente sostenere un'apertura nei confronti di sguardi molteplici, indicando, all'interno di un orizzonte di adattamento di lungo periodo, strategie e azioni che altri autori metteranno in campo nel tempo secondo necessità al momento non prevedibili. Un metodo di lavoro che, da un lato, intende definire, nel prossimo futuro, traiettorie di progetto e strumenti da predisporre in cui nuove ecologie tecno-performative (Gausa, 2022) genereranno figure ibride, simbiotiche e flessibili a par-

tire dalle relazioni tra modulo e modularità, dall'altro intende offrire un punto di vista diverso rispetto a pratiche di rinaturalizzazione espressione di un'interpretazione limitante del paradigma ecologico ed offrire una strada alternativa per il loro progetto.

Modern marshes reclamation has created landscapes that are an expression of a productivist view of natural space and the result of profound transformations of the environment for economic, social, health and cultural reasons. The outcome

of this process was the replacement of pre-existing ecosystems. Reclamation projects are an expression of human control over nature unfolded through the redefinition of the relationship between land and water. This relationship became one of separation, reconfiguring or, more often, negation of the pre-existing socio-ecological dynamics. The nature of the marsh – perceived as an uncertain, risky and unproductive space – had to be normalized, reorganized, and 're-generated'. This approach often resulted in the realization of territorial re-construction projects characterized by their geometric design. This re-measurement of

Metaponto	Modern Reclamation Goals	Results on the Reclaimed landscape (Module)	Impacts and Fragilities	Ongoing Process	Climate Adaptation (Modularity)
Hydrological infrastructure	Re-organization of natural overland flow Wet areas had been completely erased, also for health reasons	Artificialization of natural watercourses and rivers to prevent flooding and water storage Pond's land fill Construction of reclamation canals and structures (also mechanical) for land's drying and irrigation purpose	Alteration of water quality Salt water intrusion Subsidence in drained lands Coastal seaside erosion Biodiversity loss (Bentivenga, Giano and Piccarreta, 2020)	Mapping flood risks concerning rivers	Long-term techno-natural intervention of re-naturalization of rivers and naturation of canals between island and coastal areas
Mobility infrastructure	Creating a modern infrastructural system for agricultural production	The road system is structured around the E90 road and its transversal roads, connecting coast and inland areas A Coastal Railroad connected Puglia to Calabria region	Water pollution Noise pollution Interruption of ecological connectivity	Implementation of slow mobility for tourism purpose	Design infrastructure as green corridors for enhancing ecological connectivity and mitigation Enhancing alternative mobility
Agricultural pattern	After draining the soil, a reclamation pattern has been established for maximizing resource-intensive agricultural production	A patchwork of multi-dimensional grid with different size parcels according to foreseen cultivation and soil qualities, which integrated existing traces of previous rural modules (also from Greek Colonization) Recurrent plot 150x300 m (Percoco, 2010, p. 82)	Water pollution from agricultural runoff Accumulation of agricultural chemicals in soil Soil humus thinning Subsidence of agricultural area Estimated reduction in agricultural activity in the near future Aggressive exotic species proliferation	Experiences for more sustainable agriculture practice	Enhance biodiversity and aesthetic variety of crop fields, also through the implementation of small-scale phytoremediation technique and new forms of water-tolerant agriculture
Community and settlement infrastructure	Displacement of political dissidents as workers for reclamation during Fascism With the Riforma Agraria development, new immigrants and local people became new inhabitants A diffused system of farmhouse and urban densities	One family one plot. Rooting and isolating the peasant family to land through property acquisition A hierarchical settlement structure made by 'centri' and 'borgate di servizio'. Single-family house for farmers at the intersections of the infrastructural grid, isolated but also in group of two or four	Social inequalities to risk and disaster Water pollution from urban runoff and water waste Rural settlement abandonment and impoverishment Sprawl phenomena around modern centre Inadequate sewage system Agricultural land erosion	Depopulation seems unstoppable Tourism development provides a seasonal increment of people in the coastal area	Consider present and future social asymmetries inside climate scenarios involve communities in the management Re-consider depopulation and abandonment between coastal and inner areas inside climate scenarios

Tab. 2 | Between Module and Modularity: Metaponto Plain (credit: C. Brisotto and A. Raffa, 2023).

space was the attempt to obtain a more efficient mechanism of natural resource exploitation and, from a cultural perspective, the expression of human control over natural space.

Modern reclamation landscapes have transformed wetlands into self-sufficient territorial machines in which infrastructural networks, techno-natural spatial devices, cultivation patterns and settlement logics have established their otherness with respect to both the pre-existing amphibious nature and the context to which they belonged. Prior to reclamation, the modularity of wetlands was shaped by their amphibious and ecotonal di-

mensions, and they were capable of a resilient re-organization (Kharrazi et alii, 2020) following calamitous events. Thus, the shape, scale and dimension helped to inform the socio-ecological resilience of a place (Walker and Salt, 2012); this formal structure has been replaced by an alternative and segregated modular matrix, which has made them particularly fragile to socio-ecological and climatic changes. Although the replacement of wetland habitats developed within the specificities of each local context, it became a phenomenon of global significance (Fluet-Chouinard et alii, 2023). Globally, the loss of wetlands since the 18th cen-

tury is estimated to be around 87%, with a significant acceleration from the 19th century onwards, when around 70% of wetlands were converted to agricultural and settlement uses (Davidson, 2014).

The Ramsar Convention (UNESCO, 1971) recognized the global importance of preserving what would be termed wetlands and no longer marshes. This semantic change sought to curb the transformation process of these areas, recognizing that these complex amphibian ecosystems play a crucial role in preserving biodiversity, regulating the water cycle, and more recently, mitigating and adapting to the effects of climate change.

Today, we must manage modern reclamation landscapes with innovations capable of meeting the challenges of sustainable development, and to face the contemporary uncertainties, including the unavoidable significant and even structural transformations driven by climate change. It is precisely climate change's present or projected effects on modern reclamation landscapes, both coastal and inland, that will call into question the segregated relationship between land and water, between natural and cultural, human and non-human, and between production needs and biodiversity protection, reconfiguring the modular matrix. To meet this challenge, there is an urgent need to reflect on the role of multi-scalar land plans that no longer work as control strategies for food production and health purposes, but also as strategies to envision and synthesize the complexity of solutions addressing ecological, social and cultural needs.

In this sense, the module – the designed matrix of these modern landscapes – must be seen as a possible key to the contemporary interpretation of their fragilities and a starting point for its transition to possible forms of modularity that will change the relationship with nature through the adoption of Green and Blue Infrastructure and Nature-based Solutions (NbS). Considering that modularity was the attribute of a system's socio-ecological resilience of wetlands before the module of reclamation was forced into them, what forms of modularity can be expressed in the future to support climate change adaptation processes?

These landscapes offer themselves as a space for reflection and experimentation of new approaches and integrated operational methodologies of strategies and actions that define new ecologies and aesthetics achieved through design for adaptation. The present contribution is placed within this perspective, carrying a qualitative-comparative study to bring out relevant issues and themes from the hitherto unexplored comparison between two modern reclamation landscapes: the Everglades in Florida (US) and the Metaponto Plain in southern Italy.

The contribution is divided into six sections. First, the authors report the state of the literature, including critical reflections and design experi-

ments; in the second section, the theoretical-critical and methodological-operational limitations of current approaches are presented. The third section describes the method adopted by the authors for the conducted study, which is described in the fourth and fifth sections. The paper concludes with a final reflection that opens toward new operational possibilities for climate change adaptation of modern reclamation landscapes.

Debate and design experiments | An analysis of the literature shows how the original amphibious condition and the increased global focus on wetlands and their climate mitigation and adaptation potential push reclamation landscapes towards transformations that prioritize their re-naturalization (Temmink et alii, 2023). The reintegration of water flow and supervised re-naturalization processes seek to respond to ecological issues, such as the loss of biodiversity due to industrial-agricultural land use, to reduce the effects of food production pollution on environmental quality (Cataldo et alii, 2014; Marshall, Pielke and Steyaert, 2003) and those of climate change (Ojanen and Minkinen, 2020; Baptist et alii, 2019; Ingebritsen et alii, 1999), according to varying scales and temporalities. The relationship between agricultural activity and water is also re-imagined, in a regenerative and impact-reducing way, by introducing alternative practices (Pakalne et alii, 2021; Baldwin, 2020).

New wetland ecosystems also interact within urban spaces, as in the case of Balmori Associates' proposal for the Underline¹ in Miami (2015). Reusing spaces beneath a viaduct becomes the place of new human-nature relationships in the urban environment (González-Campaña, Lafaurie-Debany and Rabazo Martin, 2023). The linear sequence of urban ecosystems alludes to those that once existed between the Everglades and the coast, which the Underline project intends to reconnect.

Within an increasingly polarized debate, ecological reasons, as well as climate mitigation and adaptation, need to push the emergence of 'new natures' (Renes, 2018) that seem to be the only possible alternative to the catastrophic impacts of the Anthropocene. Re-naturalizations often generate multiple levels of conflict between cultural positions and particular interests, especially in

those historical contexts where the module of agricultural infrastructures is an identifying morphological element. These interventions are often indifferent to the existing techno-natural forms that were expressions of the modular matrix of land reclamation and to the palimpsest to which they belong (Corboz, 1998). The effect is an agreement between design and process outcomes. While, on the one hand, the literature focuses on the role of re-naturalization processes and practices in responding to specific problems or contexts, on the other hand, it highlights explorations of modern reclamation landscapes and climate change from the perspective of the design disciplines. This second approach yields fragmentary results of landscape-based projects from which a homogenizing tendency emerges oriented towards wild and wetland habitat restoration operations.

The present study reviews experiences and practices of the multiple entanglements between the reclamation module and modularity related to adaptation to climate change. It also reviews projects that explicitly and non-explicitly adopt strategies and actions that outline relevant approaches and have informed the analysis and comparison of the case studies. The following paragraphs briefly describe two design experiments conducted in reclamation areas that reflect on how the existing module becomes an opportunity towards possible forms of modularity with effects on the socio-ecological resilience of each context.

A significant approach is the one that led the OMA / Rem Koolhaas studio to the elaboration of the project for Haarlemmermeerpolder (1986). The Dutch studio explores the future urban dimension of a polder starting from its modular structure. The structure is recognized as an ordering and stable element and as an articulation of a multiplicity of possible uses. OMA projects the agricultural armature of the polder soil – a remnant of a centuries-old culture of mutual adaptation between society and environment (van Bergeijk and Piccinini, 2022) – into a new urban dimension where past and future dialogue with the present by juxtaposing architectures, elements, and uses with different relationships with the reclamation module. The aim is to establish unity and coherence without eradicating differences and incongruities (Van Gerrewey, 2015). The plot of the agricultural



Fig. 2, 3 | Modern Reclamation Landscapes: Metaponto Plain and its territory (credits: C. Brisotto and A. Raffa, 2023; source: RSDI Basilicata, 2023).



Fig. 4 | Module: Metaponto Plain and its rural patterns (credit: C. Brisotto and A. Raffa; sources: Google Earth and RSDI Basilicata, 2023).

Fig. 5, 6 | Module: rural patterns and concentrated settlement infrastructure (credits: C. Brisotto and A. Raffa; source: RSDI Basilicata, 2023).





Fig. 7 | Module: settlement infrastructure (credit: C. Brisotto and A. Raffa; source: Google Earth, 2023).

infrastructure of the polder becomes an opportunity to experiment with multiple urban configurations: building densifications and large urban infrastructures alternated to green public spaces for agriculture and recreation, wooded areas and a controlled flooding area with fish farming and re-naturation spaces.

Albeit at a larger scale, another significant example is the P-RexLab / Alan Berger project in the reclamation landscape of the Agro Pontino. Berger applies his Systemic Design approach (Berger, 2009) focusing mainly on the water infrastructure, its measurements and pollution patterns. Grounded on multi-scalar analysis, Berger and his team propose the design experiment called Wetland Machine, «[...] a 2 sq km constructed wetland park [...] that would both provide a recreational landscape [...] and remove pollutants»². Berger's ecological-landscape project, although not realized, introduces a new way of thinking through an integrated and holistic process of systemic reclamation to improve water quality and groundwater recharge potential, increase biodiversity and provide recreational space (Berger et alii, 2010).

The design of a new topography and amphibious ecologies and the implementation of NbS are not guided by the intention of locally restoring the wetland ecosystem before the reclamation; instead, it is redesigned according to the current patterns of environmental, economic and social fragility, recognizing the infrastructural identity of the Pontine Marshes. The modular structure that characterizes the reclamation of the Agro Pontino is introduced both on a conceptual level, as a tangible expression of its dimension as a territorial machine, and on a design level through the reiteration of modular structures for water purification.

The 'cum Natura' project: intertwining space, science, and humanity beyond the current limits

The ecological-political reasons pushing climate change adaptation are leaning towards re-naturalizing reclamation areas. This tendency is reflected within the disciplinary debate as highlighted by some design experiments that explore the restoration of ecosystems, natural dynamics and biodiversity by reconvertng them into wetlands. This prevalent approach shows a number

of limitations. From a theoretical point of view, it does not consider that nature and climate are a product of the culture of a specific time and context, as the semantic translation from marsh to wetland demonstrates. Additionally, this idea of nature detached from culture and context contributes to the spread of homogenizing solutions that do not take into account the bio-cultural diversity of the local conditions, which is spatially expressed by the module and its 'materials', in reclamation landscapes,

From a critical point of view, climate change adaptation strategies in these contexts do not address the complexity that has contributed to redefining them over time. This limitation might be related to the scarcity of studies covering this topic and the homologation of approaches: it shows the lack of focus on the remediation module and the modularity that could be expressed in adaptation. The methodological-operational point of view, the theoretical-critical limitations described above, as well as the design experiments conducted, denounce the need to redefine established approaches. The two design experiments cited above unveil how it is possible to think about the transformation of reclamation contexts in a complex manner, far from sterile polarizations, and address the ecological, social and cultural dimensions through an integrated approach. However, adapting to climate change requires further reflection on the possible futures of these landscapes. Although necessary, the clear prevalence of technical-scientific approaches limits the inclusion of socio-cultural and spatial aspects essential for understanding the concept of nature within its context.

Therefore, to overcome these limitations, new operational methodologies should be developed, as well as tools that can lead to trajectories for adaptation, overcoming the divide between cultural and natural, human and non-human, material and immaterial. The aim is to move towards collaborative, multidisciplinary, multi-scalar and multi-temporal working logics (Davidová, Barath and Dickinson, 2023).

Methodology | Starting from the gaps in the literature and the limits found in the current approach-

es, this contribution intends to introduce a different way of looking at climate change adaptation projects in reclaimed land through a qualitative-comparative methodology focusing on the reclamation module and possible future modularity. The contribution compares the modern reclamation landscape of the Everglades and the Meta-ponto Plain to highlight similarities and differences between two transformation processes belonging to the same historical period but expressing different political-cultural contexts.

The two case studies are emblematic of the ecological reorganization and re-modulation of reclamation areas between impacts and endogenous forms of fragility that the effects of climate change will exacerbate. Furthermore, with respect to the climate issue, the comparison will inform the adaptation process of the Italian case with respect to the expected climate tropicalization scenarios of the Mediterranean area.

Starting from this comparison, the contribution intends to reflect on the future of modern landscapes that have emerged from the reclamation of wetlands, raising questions and identifying key issues to construct a future operational methodology, and identifying strategies and actions that address the complexity of the contexts examined. The final goal is to understand how modularity can be expressed through the complex, multi-scalar and multi-temporal design for climate change resilient adaptation.

Two emblematic reclamation landscapes: Everglades and Metaponto

The case of the Everglades Agricultural Area (EAA) emblematically represents the state of Florida's development process that made it one of the most populated regions in the United States. Between the beginning of the 19th century and the early 20th century, the reclamations implemented in this portion of wetlands were developed for agricultural purposes. The processes intensified with the advent of air conditioning in the late 1940s when new residents settled in the territories further south. Driven by a logic similar to the Dutch polders, reclamation policies shaped thousands of square kilometers of arable land through a dense network of canals that altered the natural water flow on a regional scale. The scope was to produce food for new residents who were primarily in the labor force and for distribution across the entire United States.

This productivist policy reflecting primordial needs transformed what was until then evocatively called the River of Grass, alluding to a fluid and changing expression of a landscape between water and vegetation. This transformation changed an ecosystem recognized for its ecological and cultural value by the indigenous peoples to a purely productive territory. In this light, this place, which could perform multiple functions and have different meanings, became a territory dedicated exclusively to a single function. Even before the more recent changes, history has shown that the climate had claimed that land during two of the most catastrophic hurricanes in 1926 and 1928, destroying crops and killing residents, especially the poorest. Today, the Everglades Agricultural Area has seen the abandonment of many of its settlements and an increase in pollution related to agricultural activity; it also sees the organic soil

layer thinning, making the land even more prone to flooding and saltwater intrusion.

The Italian case of the Metaponto Plain is the expression of a modern land reclamation project that has overwritten different cycles of reclamation and re-wilding that started with the Greek colonization. From the coastal area and its alluvial plain to the watershed areas that reach inland, its form is an expression of this stratification that has shaped an agricultural landscape now recognized as having cultural interest. In the Italian context, the Metaponto Plain is a relevant case of a reclamation landscape stratified between the coastline and inland areas, where tourist and agricultural development clashes with the expected sea rise scenarios in the face of considerable levels of coastal erosion. The Metaponto Plain is emblematic for its peculiar historical stratification and the socio-ecological fragilities and vulnerabilities developed during the 20th-century reclamation and subsequent developments. Future climate change effects will contribute to increasing these socio-

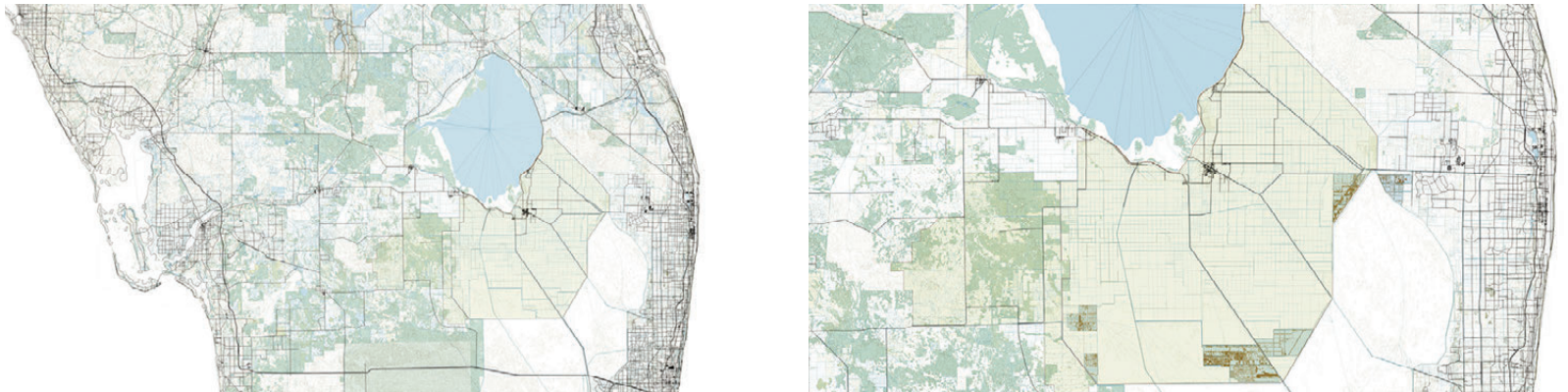
ecological fragilities in the absence of adaptation strategies and actions.

Comparison between Everglades Agricultural Area and Metaponto Plain: from module to modularity

The case studies were intentionally selected for their geographic, scalar (Fig. 1), cultural, social and ecological diversity, but they reveal similarities in approaches to the modern marsh transformation project. The authors conducted the comparison by identifying categories to interpret and reflect on specific examples of the concept of the module, highlighting impacts and fragilities, and identifying ongoing processes. Lastly, the comparison defines climate adaptation strategies through forms of modularity (Tabb. 1, 2). In both cases, the natural space of the marsh and its ecological dynamic had been completely reorganized. In the Metaponto Plain, the wilderness is almost entirely replaced by the landscape of the 'Bonifica Integrale' land reclamation, and then of the post-war 'Riforma Agraria' (Fig. 2, 3).

The latter was a cultivated, infrastructural, inhabited landscape, in some ways a 'modern colonization landscape' crossed by canals, inter-country roads and fields and farmhouses that define a new measurement of the land (Figg. 4-6).

In the American case, a zoning logic divides the Everglades hydrologically and topographically, reorganizing the natural space through a complex water system that entirely changes the water flow on a regional scale (Figg. 7, 8). The wild nature of the swamp is maintained in certain areas but eliminates its original ecological functionality. The spatial grid of paths and canals organize the fertile soil close to Lake Okeechobee, the EAA (Fig. 9), to maximize the efficiency of the agricultural production system (Figg. 10-13). It is precisely the anthropocentric and segregated approach between land and water – an approach that has shaped these landscapes – that needs to be rethought from a systemic perspective (Walker and Salt, 2006) to develop scenarios of adaptation to the challenges of a changing climate. The



Figg. 8, 9 | Modern Reclamation Landscapes: EAA (credits: C. Brisotto and A. Raffa; source: data UF Geoplan Center-Florida Geographic Data Library, 2023).



Fig. 10 | Module: EAA, its rural pattern and infrastructural system (credit: C. Brisotto and A. Raffa; sources: UF Geoplan Center-Florida Geographic Data Library e Google Earth, 2023).

Figg. 11, 12 | Module: EAA rural pattern (credits: C. Brisotto and A. Raffa; source: Google Earth, 2023).



Fig. 13 | Module: EAA settlement infrastructure (credit: C. Brisotto and A. Raffa; source: Google Earth, 2023).

correlation between land and water expressed by the module will have to face a greater complexity and activate a circular rather than a vertical dynamic.

Looking at reclamation landscapes and their modules through the lens of modularity means exploring the possibilities of multi-scale design to improve their socio-ecological resilience to shocks as well as to the accumulation of many small events over time. Landscapes characterized by modularity as an attribute of resilience are functionally, culturally, and aesthetically diverse, offer diverse ecosystem services, and are flexible and more easily adaptable to change, allowing for adaptive management over the long term. Using the lens of modularity helps to understand reclamation landscapes, their modular matrix, and their potentials in terms of future strategies and actions in the medium and long term. Thus, the reflection would be able to envision spatially valuable techno-natural solutions that can enhance the identity of these landscapes facing an uncertain future. Grounding on this idea, the methodological-operational construction should be based on three dimensions: the ecological performance, the production, and the process.

The performative dimension looks at infrastructures, both hydraulic and transportation, through the lens of the ecological paradigm. Both structures, which impose a territorial design based on control and efficiency, must become flexible, multifunctional, and open by implementing Nature-based Solutions. The solutions to be adopted do not choose naturalization as an a priori but with respect to present or possible adaptation needs that will be suggested by listening to the place and its inhabitants and climate models. In this way, it will be necessary to look at forms of re-naturalization not as a strategy imposed from above but as a possibility to be integrated into the context through the multi-scalar approach that the ecological lens makes necessary.

The productive dimension requires looking at the agricultural space from a sustainable and regenerative resource perspective. Due to expected climatic changes, this dimension must undergo a rethinking of its models within a more complex framework of present and future ecological dy-

namics. That is, it means rethinking cultivation practices that are more adaptable to climatic conditions and their impacts. The fields defined by the module can become spaces to experiment with new forms of coexistence between humans and non-humans, water and land, traditional techniques and other cultivation practices. One possible example is paludiculture, an alternative rewetting practice to dry soil cultivation, which offers a series of benefits: it improves soil and water quality, reduces subsidence phenomena and CO₂ emissions, and has positive impacts on biodiversity. As a consequence, the design of agricultural space will accommodate a new complexity, also in relation to the performative dimension.

The process dimension is crucial in the transformation from module to modularity, as it shifts the focus from the module outcome to the modularity process to improve climate resilience. The process becomes crucial if one wants to organize the different dimensions (performative and productive) according to the specific palimpsest; this practice still needs to be revised compared to practices of homogenizing re-naturalization. The Metaponto Plain, from this point of view, is an emblematic case: the reclamation modules, starting from the 7th century B.C., together with the advancing and receding of the marshes, have been differentially overwritten and have oriented the design of its modern landscape.

An interpretation of the module's variations with respect to even the most diverse socio-economic-ecological and climatic conditions could inform possible adaptation strategies interpreted according to a multi-temporal and multi-scalar approach. Although less evident, this theme is also visible in the Everglades. Here, the new climate-sensitive techno-natural infrastructure considers solutions that could intersect the elusive traces of the Native American culture, which was an expression of different modules. The reiteration of native elements acts in a discrete manner and with a different relationship with the environment. Therefore, the palimpsest will have to integrate the performative and productive dimensions with the cultural and social ones. It becomes crucial to consider within the process all the stakeholders (public administrations, farmers' associations, citizens,

etc.) that have a role in managing and modifying the territory and places (Brisotto and Carney, 2022).

Conclusions: towards an operational methodology | The comparison between the two selected territories focusing on the concepts of module and modularity led to themes and issues that could orient future strategies and actions for the Metaponto and the Everglades adaptation projects and similar reclamation landscapes. The challenges that climate change poses on these areas' functioning logics, socio-ecological dynamics, and ways of living underlying their modules require a reflection on the operational possibilities of modularity. The modularity spatial expressions are opportunities for new methodologies and tools to explore possible design trajectories.

As shown, a design approach to these contexts must consider the complexity of their nature through a holistic, integrated, and multidisciplinary view in which the uncertainty that climate change brings becomes an opportunity to rethink the module concept according to a modularity principle. This new approach delves into the complex interconnections between ecological, social, economic, political, and cultural dimensions and possible climate scenarios. The two selected cases can be the ground for future research-driven design experiments as methodological-operational construction that look at reclamation landscapes as spaces for an 'eco-imaginative landscape architecture' (Comer, 1997). Within a multi-scalar strategy based on climatic scenarios, it will be possible to adopt solutions at the local scale capable of improving the resilient adaptation capacity but also the quality of places over time with the people who inhabit them. A method that is a process – as well as a project inspired by the concept of open work (Eco, 1962) and founded on complex thought (Morin, 2000) and trans-disciplinarity (Nicolescu, 2002) – acquires multiple criteria – for example, the intertwining of module and modularity that guided the comparison of this study – in the reading, interpretation, and phenomenological understanding of reality and its dynamic structures (Ingold, 2008).

While recognizing the synthetic dimension of design, the process described above intends to sustain programmatically an openness towards multiple perspectives. In this light, the process can indicate strategies and actions in the long-term adaptation that other authors will put in place over time according to needs that cannot be foreseen at the beginning. This method is intended to define near-future design trajectories and tools to envision new techno-performative ecologies (Gausa, 2022), generating hybrid, symbiotic and flexible geometries based on the relationships between module and modularity. Additionally, it intends to offer a different point of view with respect to denaturalization practices that are the expression of a limiting interpretation of the ecological paradigm and provide an alternative pathway for their design.

Acknowledgements

The contribution is the result of the collaborative work of the Authors. In alphabetical order: C. Brisotto contributed to the drafting and revising of the article; J. Carney reviewed the article; I. Macaione contributed to the drafting and revision of the article; A. Raffa coordinated activities among the Authors, conducted bibliographic research, guided and contributed to the drafting of the article within the scope of the 'Urban Green Shapes' project funded by PON R&I – FSE REACT-EU.

Notes

1) For more information, see the webpage: balmori.com/portfolio/underline [Accessed 7 October 2023].

2) For more information, see the webpage: alanmberger.com/pontine-marshes#11 [Accessed 7 October 2023].

References

- Baptist, M., van Hattum, T., Reinhard, S., van Buuren, M., de Rooij, B., Hu, X., van Rooij, S., Polman, N., van den Burg, S., Piet, G., Ysebaert, T., Walles, B., Veraart, J., Wamelink, W., Bregman, B., Bos, B. and Selnes, T. (2019), *A nature-based future for the Netherlands in 2120*, Wageningen University & Research, Wageningen. [Online] Available at: doi.org/10.18174/512277 [Accessed 7 October 2023].
- Baldwin, M. (2020), "Peat / Land – Strategies for Restoration, Design, and Planning of North Carolina Peatlands", in *2020 ASLA Student Awards*. [Online] Available at: asla.org/2020studentawards/1013.html [Accessed 7 October 2023].
- Bentivenga, M., Giano, S. I. and Piccarreta, M. (2020), "Recent Increase of Flood Frequency in the Ionian Belt of Basilicata Region, Southern Italy – Human or Climate Change?", in *Water*, vol. 12, issue 7, article 2062, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/w12072062 [Accessed 7 October 2023].
- Berger, A. (2009), *Systemic Design can change the World*, SUN Publishers, Amsterdam.
- Berger, A., Brown, C., Kousky, C. and Zeckhauser, R. (2010), "The Five Neglects – Risks Gone Amiss", in Kunreuther, H. and Useem, M. (eds), *Learning from Catastrophes – Strategies for Reaction and Response*, Wharton School Publishing, Upper Saddle River (NJ), pp. 83-99. [Online] Available at: scholar.harvard.edu/files/rzeckhauser/files/five_neglects.pdf [Accessed 7 October 2023].
- Brisotto, C. and Carney, J. (2022), "Co-design strategies to achieve trust in Urban Living Lab – A systematic literature review", in Jarret, C. and Sharag-Eldin, A. (eds), *Proceedings of the ARCC-EAAE International Conference in Miami, Miami, Florida, US, March 2-5, 2022*, Architectural Research Centers Consortium, pp. 137-144. [Online] Available at: arcc-arch.org/wp-content/uploads/2022/09/ARCC-EAAE-2022_Proceedings_Digital-Version.pdf [Accessed 7 October 2023].
- Cataldo, S., Copiz, R., Lorito, A., Magaouda, S., Parente, S., Perotto, C. and Valle, N. (eds) (2014), *Rewetland – Un programma di area vasta per riqualificare le acque superficiali dell'Agro Pontino con le tecniche di fitodepurazione*, Edizioni Belvedere, Latina. [Online] Available at: rewetland.eu/life/news/140612_Pubblicazione-finale-Rewetland.pdf [Accessed 7 October 2023].
- Central and Southern Florida Project Everglades Agricultural Area Storage Reservoirs (2005), *Draft Integrated Project Implementation Report – Environmental Impact Statement – Annexes and Appendices*.
- Corboz, A. (1998), *Ordine sparso – Saggi sull'arte, il metodo, la città e il territorio*, FrancoAngeli, Milano.
- Corner, J. (1997), "Ecology and landscape as agents of creativity", in Thomson, G. F. and Steiner, F. R. (eds), *Ecological Design and Planning*, John Wiley & Son, New York, pp. 81-107.
- Davidová, M., Barath, S. and Dickinson, S. (2023), "Ambienti culturali con prospettive non solo umane – Prototipazione attraverso ricerca e formazione | Cultural environments with more-than-human perspectives – Prototyping through research and training", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 165-178. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13142023 [Accessed 7 October 2023].
- Davidson, N. C. (2014), "How Much Wetland Has the World Lost? Long Term and Recent Trends in Global Wetland Area", in *Marine and Freshwater Research*, vol. 65, pp. 934-941. [Online] Available at: doi.org/10.1071/MF14173 [Accessed 7 October 2023].
- Eco, U. (1962), *Opera Aperta – Forma e Indeterminazione nelle poetiche contemporanee*, Bompiani, Milano. [Online] Available at: monoskop.org/images/a/ab/Eco_Umberto_Opera_aperta_4e.pdf [Accessed 7 October 2023].
- Fluet-Chouinard, E., Stocker, B. D., Zhang, Z., Malhotra, A., Melton, J. R., Poulter, B., Kaplan, J. O., Goldewijk, K. K., Siebert, S., Minayeva, T., Hugelius, G., Joosten, H., Barthelmes, A., Prigent, C., Aires, F., Hoyt, A. M., Davidson, N., Finlayson, C. M., Lehner, B., Jackson R. B. and McIntyre, P. B. (2023), "Extensive global wetland loss over the past three centuries", in *Nature*, vol. 614, pp. 281-286. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41586-022-05572-6 [Accessed 7 October 2023].
- González-Campaña, J., Lafaurie-Debany, N. and Rabazo Martin, M. (2023), "Realizzare paesaggi innovativi – Balmori Associates ridefinisce il rapporto uomo-natura per le città del futuro | Making innovative landscapes – Balmori Associates redefining the human-nature relationship for the cities of the future", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 31-42. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1322023 [Accessed 10 October 2023].
- Kharrazi, A., Yu, Y., Jacob, A., Vora, N. and Fath, B. D. (2020), "Redundancy, Diversity, and Modularity in Network Resilience", in *Current Research in Environmental Sustainability*, vol. 2, article 100006, pp. 1-7. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.crsust.2020.06.001 [Accessed 7 October 2023].
- Gausa, M. (2022), "Topologie verdi e paesaggi oltre il paesaggio – 30 anni di ricerche sulla ibridizzazione del verde | Green topologies and landscapes beyond the land – A 30-year research on green hybridization", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 14-25. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1112022 [Accessed 7 October 2023].
- Ingebritsen, S. E., McVoy, C., Glaz, B. and Park, W. (1999), "Florida Everglades – Subsidence threatens agriculture and complicates ecosystem restoration", in Galloway, D., Jones, D. R. and Ingebritsen, S. E. (eds), *Land Subsidence in the United States*, U.S. Geological Survey, circular 1182, pp. 95-106. [Online] Available at: pubs.usgs.gov/circ/circ1182/pdf/12Everglades.pdf [Accessed 7 October 2023].
- Ingold, T. (2008), "Bindings against Boundaries – Entanglements of Life in an Open World", in *Environment and Planning A – Economy and Space*, vol. 40, issue 8, pp. 1796-1810. [Online] Available at: doi.org/10.1068/a40156 [Accessed 7 October 2023].
- Marshall, R. A., Pielke, R. and Steyaert, L. (2003), "Wetlands – Crop freezes and land-use change in Florida", in *Nature*, vol. 426, pp. 29-30. [Online] Available at: doi.org/10.1038/426029a [Accessed 7 October 2023].
- Morin, E. (2000), *La testa ben fatta – Riforma dell'insegnamento e riforma del pensiero*, Raffaello Cortina Editore, Milano.
- Nicolescu, B. (2002), *Manifesto of Transdisciplinarity*, State University of New York Press, Albany.
- Ojane, P. and Minkinnen, K. (2020), "Rewetting offers rapid climate benefits for tropical and agricultural peatlands but not for forestry-drained peatlands", in *Global Biogeochemical Cycle*, vol. 34, issue 7, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1029/2019GB006503 [Accessed 7 October 2023].
- Pakalne, M., Etzold, J., Llomets, M., Jarašius, L., Pawlaczyk, P., Bociang, K., Chlost, R., Gos, K., Libaures, K., Pajula, R., Purre, A. H., Sendzikaite, J., Strazdina, L., Truus, L., Zableckis, N., Jurema, L. and Kirschev, T. (2021), *Best Practice Book for Peatland Restoration and Climate Change Mitigation – Experiences from LIFE Peat Restore Project*, University of Latvia, Riga. [Online] Available at: researchgate.net/publication/357776095_Best_Practice_Book_for_Peatland_Restoration_and_Climate_Change_Mitigation_-_Experiences_from_LIFE_Peat_Restore_Project [Accessed 7 October 2023].
- Percoco, A. (2010), *Policoro – Da villaggio di bonifica a centro ordinatore del Metapontino*, Consiglio Regionale della Basilicata, Potenza. [Online] Available at: consiglio.basilicata.it/archivio-news/detail.jsp?otype=1140&id=287732&typePub=100241 [Accessed 7 October 2023].
- Renes, H. (2018), "New Nature in Old Landscapes – Some Dutch Examples of the relation between History, Heritage and Ecological Restoration", in *Environmental Values*, vol. 27, issue 4, pp. 351-375. [Online] Available at: doi.org/10.3197/096327118X15251686827714 [Accessed 7 October 2023].
- Richardson, C. J. (2008), "The Everglades – North America's Subtropical wetland", in *Wetlands Ecology and Management*, vol. 18, issue 5, pp. 517-542. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11273-009-9156-4 [Accessed 7 October 2023].
- Sklar, F. H., Chimney, M. J., Newman, S., McCornick, P., Gawlik, D., Miao, S. L., McVoy, C., Said, W., Newman, J., Coronado, C., Crozier, G., Korvela, M. and Rutchev, K. (2005), "The ecological-societal underpinning of Everglades restoration", in *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 3, issue 3, pp. 161-169. [Online] Available at: [doi.org/10.1890/1540-9295\(2005\)003\[0161:TEUOER\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0161:TEUOER]2.0.CO;2) [Accessed 7 October 2023].
- Temmink, R. J. M., Robroek, B. J. M., van Dijk, G., Koks, A., Käärmelahti, S., Barthelmes, A., Wassen, M., Ziegler, R., Steele M., Giesen, W., Joosten, H., Fritz, C., Lamers, L. and Smolders, A. (2023), "Wetscapes – Restoring and maintaining peatland landscapes for sustainable futures", in *Ambio*, vol. 52, pp. 1519-1528. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s13280-023-01875-8 [Accessed 7 October 2023].
- UNESCO (1971), *Convention on Wetlands of International Importance especially as Waterfowl Habitat*. [Online] Available at: ramsar.org/sites/default/files/documents/library/scan_certified_e.pdf [Accessed 7 October 2023].
- van Bergeijk, H. and Piccinini, D. (2022), "Land-Nature and its Economic and Cultural Value – The Case of the Zuiderzee Reclamation", in Brisotto, C. and Lemes de Oliveira, F. (eds), *Re-Imagining Resilient Productive Landscapes Perspectives from Planning History*, Springer, Switzerland, pp. 51-71. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-90445-6_3 [Accessed 7 October 2023].
- Van Gerrewey, C. (2015), "Imagining the Dutch polder Landscape – A Design by OMA from 1986", in *Journal of Landscape Architecture*, vol. 10, issue 3, pp. 20-27. [Online] Available at: doi.org/10.1080/18626033.2015.1094900 [Accessed 7 October 2023].
- Walker, B. and Salt, D. (2012), "A Resilient World", in Walker, B. and Salt, D. (eds), *Resilient Practice – Building Capacity to Absorb Disturbance and Maintain Function*, Island Press, pp. 185-199.
- Walker, B. and Salt, D. (2006), "Carving up a National Icon – The Florida Everglades", in Walker, B. and Salt, D. (eds), *Resilient Thinking – Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*, Island Press, pp. 15-27.

ARTICLE INFO

Received	06 October 2023
Revised	29 October 2023
Accepted	08 November 2023
Published	31 December 2023

I GIARDINI MODULARI DI JAMES C. ROSE

La sperimentazione per il
Ladies' Home Journal (1946)

MODULAR GARDENS BY JAMES C. ROSE

A 1946 experiment for
Ladies' Home Journal

Anna-Maria Visilia

ABSTRACT

Il 'modulo' è uno strumento progettuale intimamente connesso ai concetti di proporzione e geometria, ma anche a quelli di globalizzazione, sostenibilità ed equità. Poiché teorie e paradigmi modulari non ricoprono un posto di rilievo nel dibattito sull'architettura del paesaggio questo articolo indaga sul modulo come strumento di progettazione utilizzato dal paesaggista americano James C. Rose (1913-1991) nelle sue prime sperimentazioni concettuali, messe a punto in risposta a un bando per un servizio fotografico su una serie di piccoli giardini da pubblicare su un numero speciale del Ladies' Home Journal nel 1946. Rose ha raccolto questa sfida come esercizio progettuale proponendo dei prototipi di giardino modulare per i piccoli lotti delle case suburbane americane. Il saggio illustra i lavori di Rose che reinterpretano la modularità e la sviluppano in senso artistico con chiari richiami alla cultura giapponese mentre un'analisi del suo concetto di modulo offre l'opportunità per valutare nuove idee e processi che possono rivelarsi illuminanti nella produzione di paesaggi urbani di alta qualità.

The 'module' is a design tool that is profoundly intertwined with design concepts such as proportions and geometry as well as globalization, sustainability, and equity. Modular theories and paradigms are limited in the landscape architecture discourse. This paper examines the 'module' as a design tool in the early work and theory of American landscape architect James C. Rose (1913-1991). In 1946, the Ladies' Home Journal commissioned a series of small gardens to be photographed and published in a special issue. Rose considered this challenge as a design-build exercise to develop modular garden prototypes for small American suburban lots. Modularity was reframed in Rose's works and was developed in an artistic way that portrays close relationship to modern and Japanese ideas on this theme. An in-depth analysis and discussion of Rose's modular concepts offers an opportunity to delve into novel ideas and processes that can prove insightful for high-quality humane landscape production.

KEYWORDS

giardino moderno, Giappone, progetto creativo, materialità, equità

modern gardens, Japan, creative design, materiality, equity



Anna-Maria Visilia, Landscape Architect, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Landscape Architecture, North Dakota State University (USA). Her research focuses on the history and theory of 20th century gardens and landscapes, contemporary landscape design approaches, and cultural concepts of processes and perceptions embedded in vernacular environments. E-mail: annamaria.vissilia@ndsu.edu

Il paradigma modulare è una tema attuale che si è evoluto e affermato in architettura e nelle discipline progettuali ad essa collegate in tempi e luoghi diversi. Secondo l'Oxford English Dictionary¹ il termine 'modulo' è associato ai concetti di misurazione, proporzione, matematica, unità, armonia, ritmo, ordine, tettonica e qualità; in aggiunta la modularità è associata a un diverso insieme di concetti più dinamici quali la globalizzazione, l'equità e lo sviluppo sostenibile, come riportato da una rassegna della letteratura sull'argomento (Russel, 2012; Sposito, 2017).

In ragione del crescente dibattito e del numero esiguo di sperimentazioni sull'impiego del modulo nel paesaggio, il presente contributo indaga sulle modalità con cui 'modulo' è stato introdotto nell'architettura del paesaggio dopo essere stato individuato dal Movimento Moderno quale strumento strategico per affrontare le sfide del ventesimo secolo. In particolare si analizza l'opera di James C. Rose (1913-1991), primo portavoce dell'importante ruolo che un approccio modulare può assumere nella progettazione del paesaggio e, attraverso un'analisi del linguaggio e delle strategie che hanno caratterizzato i suoi giardini modulari dagli anni Quaranta agli anni Sessanta, si prendono in esame le ricadute sociali e progettuali del modulo in questo campo.

L'obiettivo è comprendere come Rose abbia sviluppato sia la propria visione del modulo basandosi sullo studio dell'architettura moderna e giapponese sia l'idea di sinergia tra caos (forma libera) e ordine (geometria) all'interno delle sue teorie e opere. Spingendosi oltre il concetto di modulo di Le Corbusier e di griglia strutturale di Mies l'opera di Rose ridefinisce la concezione del modulo come metodo per organizzare armoniosamente lo spazio, sviluppandola in senso artistico e con chiari rimandi alla filosofia giapponese sul tema. Le opere modulari di Rose testimoniano un originale approccio alla progettazione di giardini per le residenze capace di coniugare economia di mezzi, manifattura, facilità di costruzione, flessibilità, estetica e personalizzazione in ragione delle specifiche esigenze del cliente, il tutto senza penalizzare un'alta qualità del risultato.

Il contributo è strutturato con una prima breve panoramica, che contribuisce a definire il quadro teorico del tema trattato, su proporzione e modularità in quanto espressione di bellezza nel mondo antico e in epoca moderna e sui legami tra modularità da un lato e psicologia e benessere dall'altro; segue una disamina su come Rose abbia impiegato il concetto di modulo nei propri giardini, proponendo idee e processi progettuali innovativi e illuminanti nella realizzazione di paesaggi di qualità a misura d'uomo, aprendo la strada a una cultura contemporanea e a una pratica in cui valorizzare i binomi manifattura e tecnologia, qualità di realizzazione e bellezza.

Proporzione e modularità come bellezza nel mondo antico | Attraverso i secoli e nelle diverse culture in ambito architettonico e artistico si è fatto spesso ricorso alle proporzioni come strumento compositivo tecnico e qualitativo per esprimere, attraverso un'immagine di ordine, il concetto di bellezza ideale. Nell'antichità le principali teorizzazioni sulla proporzione si sono fondate su tre principi chiave: la ripetizione di un rapporto dimensionale in tutto il progetto; la presenza di articola-

zioni così che l'intero potesse facilmente essere scomposto in parti e modificato nel tempo; la flessibilità (Arnheim, 1955).

Per i Greci l'unità di misura era il diametro della colonna, un elemento architettonico che rappresentava l'espressione della bellezza perfetta, stimolo per Pitagora a elaborare un sistema matematico di proporzioni e a individuare un rapporto tra numeri armonici e universo. Riconducendo la nozione di modulo a una scelta di numeri, Heidegger ha poi esaltato il ruolo simbolico della matematica nella creazione di un ethos sociale nell'architettura greca come parte del tentativo dell'uomo di creare una società basata sulla benevolenza. Anche in Vitruvio la proporzione è stata l'elemento su cui fondare il proprio trattato sull'architettura e, attraverso lo studio dei rapporti tra modularità, matematica e geometria, creare bellezza. In seguito gli architetti del Rinascimento, come i Greci, hanno promosso un'architettura basata sulla matematica e tradotta in unità spaziali, mentre Alberti ha indagato nuovi rapporti quali quelli musicali, suggeriti dal Timeo di Platone e da Pitagora (Russel, 2012).

I primi approcci modulari in epoca moderna | All'inizio del Novecento gli architetti ritenevano che il modulo dovesse costituire un elemento del processo di progettazione e costruzione. Le American System Built Houses (1911-1916) di Frank Lloyd Wright erano realizzate con un sistema modulare pensato come un kit di componenti, simili ai mattoncini LEGO, che un'azienda specializzata commercializzava e spediva nella sua intenzione di garantire una superiore qualità in termini di progettazione e stabilità strutturale, una riduzione degli sprechi e la possibilità di non ricorrere a manodopera specializzata in cantiere. Nel 1920 Le Corbusier ha sviluppato un nuovo sistema di 'case aperte' denominato Citrohan e basato sulla prefabbricazione e sulla produzione di massa, con il cui approccio modulare ha permesso una vasta gamma di opzioni di facciate e di distribuzione ai piani, pur garantendo all'architetto un alto livello di controllo sul progetto.

Queste prime applicazioni si possono considerare il frutto di una relazione tra architetto e cliente alquanto innovativa nella quale il primo si assume la responsabilità di indirizzare le esigenze dei clienti verso una soluzione tecnicamente efficiente ed esteticamente piacevole in base alle esigenze e al potere d'acquisto del secondo. È importante rilevare che questi architetti pionieri erano animati da una rinnovata consapevolezza sul ruolo sociale della loro professione e da ideali politici: Le Corbusier dall'ideologia socialista e dal principio di un'architettura per tutti che aveva preso campo a partire dal Bauhaus (Russel, 2012).

Il concetto di sistema modulare giapponese si fonda invece su una concezione diametralmente opposta a quella occidentale, rifuggendo l'idea di una standardizzazione meccanica in luogo di una artigianalità sapientemente governata dai maestri carpentieri, le cui regole sono basate sulle risorse locali e sul tramandare la conoscenza tramite l'apprendistato. Architetti giapponesi moderni, come Ikebe Kiyoshi, si opponevano consapevolmente a Le Corbusier, si concentravano sul modulo come strumento di libertà progettuale, sulle sue implicazioni sociali, culturali e di funzionamento e

per indagare modalità di relazione tra l'uomo e l'ambiente (Kuroishi, 2009; Liotta, 2017).

Psicologia del modulo e concetto di benessere | Le Corbusier, come Vitruvio e Alberti prima di lui, ha coniugato biologia e architettura attraverso la geometria e un sistema di proporzioni per dar vita al Modulor, uno strumento antropometrico basato su sezione aurea e successione di Fibonacci. Sottesi alla griglia metrica e alle proporzioni si possono individuare i temi portanti e i principi guida delle sue istanze architettoniche: sintesi armonica e stratificata di spazio e forma, narrazioni spaziali, sintassi di rapporti ben definiti, percezioni ed esperienze sequenziali dello spazio, 'spazi ineffabili' e spazi testurizzati.

Nel fare esperienza di spazi così armoniosi si provano emozioni e un senso di appagamento generato da una composizione architettonica ben bilanciata, ordinata e strutturata; simili figurazioni spaziali generano immagini indimenticabili a cui la geometria concorre bilanciando matematica ed emozioni. Mentre sviluppava la sua idea di 'spazio ineffabile', Le Corbusier cercava sempre di suscitare emozioni spostando la definizione di architettura da sintassi chiara a successione di eventi con precise relazioni.

Lo 'spazio ineffabile' di Le Corbusier si riferisce a un'occupazione dello spazio tanto fisica quanto mentale (Charitonidou, 2022), frutto di una visione dell'architettura nella quale l'architetto ricopre un ruolo sociale nel trasformare l'esperienza dell'individuo e garantirgli benessere, mentre il cliente è l'interposto di un'opera aperta pronta ad accogliere una metamorfosi privata. Un approccio questo ulteriormente sottolineato dalla stretta collaborazione di Le Corbusier con l'artista e designer di mobili francese Charlotte Perriand, con cui ha lavorato a prototipi di scrivanie, sedie e armadi da produrre in serie, per arredare spazi ordinari con elementi flessibili, mobili e comodi.

Dopo un viaggio in Giappone Perriand ha riconosciuto l'importanza dello 'standard' di Le Corbusier, notando la somiglianza con il tatami giapponese e lo stretto rapporto tra dimensione e forma del mobilio per adattarlo a una dimensione umana; parallelamente Perriand ha esplorato la nozione di 'gesture', il contatto armonioso tra l'oggetto e il corpo umano e i suoi diversi movimenti. Queste due esperienze hanno contribuito a sviluppare il concetto di 'attrezzature integrate', mobili che consentono una varietà di 'gestures', e di 'para-pareti', che hanno ridefinito la nozione architettonica di 'parete' e di divisione dello spazio interno; tuttavia oltre alla componente funzionale la nozione di 'attrezzatura' portava con sé una componente psicologica che Le Corbusier ha sempre rigettato (Sendai, 2019).

Il concetto di modulo per James C. Rose | Nel corso del Novecento la griglia modulare è stata al centro del dibattito sul paesaggio (Pratt, 1963) e alcuni paesaggisti come James Rose e Dan Kiley l'hanno utilizzata come una 'underlying armature' per marcare le relazioni tra oggetti ed eventi (Howett, 1994; Booth 2012; Cardasis, 2017). Con una visione moderna dell'architettura Rose ha esplorato, nelle pubblicazioni dalla metà degli anni Quaranta alla fine degli anni Cinquanta, le numerose possibilità che si creavano bilanciando la sintassi e la materialità dello spazio con la flessibilità, utilizza-



Fig. 1 | The lounging area in the Tea Garden offers a memorable outdoor experience (source: Rose, 1958).

do il modulo come strategia compositiva per affrontare le sfide e dare risposte alle esigenze tecnologiche del dopoguerra (Cardasis, 2017) e al contempo per risolvere la dicotomia tra casa e giardino, una questione aperta ancora oggi nella progettazione contemporanea (Biancucci, 2017; Sarro, 2017). Come spiega Rose (1958) stesso, i suoi giardini modulari indirizzano l'attenzione verso spazi esterni creativi e sono il mezzo per pensare alla casa solo come un ennesimo ostacolo nel paesaggio che deve essere aggirato per offrire indimenticabili esperienze all'aperto (Fig. 1).

Nel 1946 il Ladies' Home Journal ha lanciato un bando per un servizio fotografico su una serie di piccoli giardini da pubblicare in un numero speciale, richiedendo solo 'fotografie da sogno, eccezionali' (Rose, 1958), al quale Rose ha risposto sfruttando l'occasione per sviluppare dei prototipi di giardini modulari per le case suburbane americane con piccoli lotti di terra. Riflettendo sui suoi giardini secondo Rose (1947a, p. 76) «For all practical purposes, it is impossible to achieve an effective garden in less space. Yet these projects are not cramped or stuffed into their restricted areas. They have been developed freely and liberally; each is capable of expansion or even some contraction».

Rose ha spiegato di aver usato precisi schemi planimetrici e verticali: «I proposed a modular system of standardized garden units including trellis members, walls and space dividers, paving, pools, and plant forms. Whatever this proposal may have lacked in 'glamour', it made up for in clarity and economy; for once such a system had been worked out, the parts could be reassembled and reused in an almost infinite variety of space patterns [...]. It also gave an opportunity to study the problems of the small garden at full scale and in many variations under controlled conditions. The idea had within it the possibility of mass reproduction, which meant that it could be economically applied to the most common landscape problem – the average home grounds. But more im-

portant, it established a discipline. It is sometimes difficult to accept self-imposed disciplines; they are too often regarded as needless shackles to liberty rather than a bridge to freedom, but it is literally impossible, in dealing with the amorphous and elusive stuff of gardens, to create an effective landscape without them» (Rose, 1958, p. 17).

Rose ha proposto una serie di sette elementi standard necessari per progettare giardini modulari creativi, «[...] the trellis, 3-ft-square paving slabs, 3-ft-square planting beds, pool designed around the same module, basket-weave fencing, shojis (translucent screens), and steps composed of standard paving slabs on prefabricated risers which permit variable riser height» (Rose, 1954, p. 81; Fig. 2). I suoi giardini sono 'elementi incidentali' del paesaggio, eventi progettati con uno schema flessibile per suscitare una varietà di emozioni e di esperienze con diverse qualità 'atmosferiche' (Fig. 3) e garantire il benessere degli utenti superando le tradizionali statiche disposizioni formali: «More is gained by indirection than at first meets the eye or is easy to admit. I always find it a minor miracle the way a chance remark or a quick, side-long glance can reveal a whole new world of experience» (Rose, 1958, p. 21).

Per testare le componenti dei prototipi modulari e calcolare le corrette dimensioni e proporzioni delle parti strutturali e spaziali (Fig. 4) Rose ha lavorato su una serie di disegni e prodotto dei mock up prima di realizzare i giardini: i disegni rappresentavano tutte le unità, erano quotati accuratamente e restituivano un 'grado di informalità' ottenuto con l'impiego di materiali testurizzati e arredi specifici; ciascun modulo presentava elementi disposti apparentemente in modo disordinato contribuendo così a una sintesi armoniosa di caos e ordine.

Si incoraggiava dunque un processo progettuale libero che consentiva numerose articolazioni a scale diverse in relazione alle esigenze visive, spaziali ed emotive dei clienti ai quali il sistema modulare permetteva di intercambiare i moduli in modalità plug-and-play, rendendo ancora più flessibile e attrattivo il sistema rispetto a necessità e creatività estemporanee. Nelle diverse varianti proposte le griglie modulari, conformate da vegetazione alta e bassa, aree a prato, pavimentazioni e specchi d'acqua, creavano una tessitura del piano visivamente sempre affascinante.

Benché potesse apparire come un'ordinata composizione di spazi esterni diversi assemblati, il progetto modulare si basava su un approccio plastico e fluido che conferiva un senso di movimento spontaneo all'interno di una matrice di spazi. Rose promuoveva i giardini modulari come strumento «[...] of organizing identical gardens and as a method to create an efficient system of standardized design components that could be used in any garden setting» (Rose, 1958, p. 17; Booth, 2012, p. 123). Attraverso una griglia di 3 x 3 piedi impiegata per un telaio modulare orizzontale e verticale, ma anche per definire tutte le aree di pavimentazione e di prato, le aiuole, la posizioni degli alberi e le diverse strutture in situ, Rose ha potuto esprimere con chiarezza la sua concezione modulare.

I giardini modulari di James C. Rose | Il Tea Garden, il Boudoir Garden, il Pool Garden, il Morning Glory Garden e il Fenced Garden, espres-

sioni diverse di un approccio modulare al progetto del giardino, sono stati pubblicati su vari libri e riviste. Rose ha descritto il Tea Garden (Fig. 5) come uno spazio tridimensionale che dà ai fruitori l'impressione di trovarsi all'interno di qualcosa pur essendo all'aperto, aggiungendo che l'aspetto era quello di un giardino racchiuso in uno spazio di 15 per 20 piedi (Rose, 1958) grazie ai materiali utilizzati: mattoni forati con innesto di erba, euforbia giapponese, gigli e fiordalisi (per la pavimentazione), shoji traslucidi in pannelli rimovibili, steli di betulla bianca e vite comune (per il perimetro) e graticci modulari, con rampicanti, rami sporgenti e 'cielo' (come copertura). L'obiettivo primario di questo piccolo giardino del tè è garantire la flessibilità d'uso che Rose ha assicurato tramite una struttura a traliccio modulare da tre piedi sulla quale applicare shoji traslucidi, con una superficie dalla qualità simile a quella di un tessuto, e rimovibili per variare il grado di intimità desiderato nei diversi momenti del giorno o della notte e nelle diverse stagioni, il tutto accompagnato da una serie di note tecniche per la costruzione delle parti modulari di questo giardino.

Il Boudoir Garden (Fig. 6) non è stato progettato come parte di una casa, ma «[...] to be photographed, and then torn down» (Rose, 1958, p. 37); secondo il suo progettista il giardino era servito mirabilmente allo scopo che si era prefisso il Ladies' Home Journal, cioè quello di illustrare l'idea del giardino glamour nei termini narcisistici del boudoir: «The mockup describes and suggests, in a practical vocabulary, the flexibility of modular system that, far from a handicap to glamour, became a productive discipline to that end. For true glamour is in the economy of effort to effect not in shadowy illusion» (Rose, 1958, p. 37).

La pavimentazione era realizzata con lastre quadrate prefabbricate di calcestruzzo, saltuariamente interrotte da piccoli specchi d'acqua; una stanza spogliatoio, un boudoir e una sala da bagno con vasca erano le principali aree funzionali del giardino, reminiscenze di una cultura antica orientale. Il carattere di intimità del giardino era assicurato dalla presenza di un frassino montano piangente e dalla struttura a traliccio su cui erano agganciate una parete trasparente e una tenda tesa sul boudoir e sulla sala da bagno; tra gli arredi erano presenti una toeletta con specchio e sedia e un'amaca macramé, elementi accuratamente selezionati e opportunamente predisposti per un «[...] relaxed and comfortable living» (Rose, 1958, p. 37).

Il Pool Garden (Fig. 7), che si sviluppa su una superficie di 20 x 30 piedi, dà l'impressione di trovarsi in 'un grande spazio' con ampie possibilità di 'metamorfosi'. Per dimostrare la portata e la flessibilità di un sistema modulare nello sviluppare un'idea dalla sua origine alla forma finale e alla successiva reinterpretazione (Rose, 1958) sono stati proposti due schemi planimetrici, 'elementi incidentali', nei quali gli stessi componenti collocati in posizioni diverse trasformavano radicalmente lo spazio. Il Pool Garden è stato progettato come un giardino 'informale' a cui si accede direttamente dalla cucina, dal soggiorno o dalla camera da letto e, come suggerito da Rose (1958, p. 27), «[...] more than 50 of them could be fitted into one acre, or one could be adopted to the smallest suburban lot». I principali componenti modulari del progetto erano il pannello di calce-

struzzo colorato per la pavimentazione, il contenitore delle aiuole e una vasca d'acqua, tutti con geometria quadrata e di tre piedi quadrati, la struttura a traliccio e una recinzione con motivo a intreccio alta quattro piedi. Secondo Rose (1958, p. 24) nuove aiuole potevano sostituire i pannelli della pavimentazione in ragione di particolari periodi di fioritura stagionale al termine dei quali era possibile ripristinare la pavimentazione. Schizzi e planimetrie sono stati redatti a partire da un mock up in scala del giardino i cui arredi sono stati accuratamente disposti come parte integrante del-

l'intero progetto e utilizzati per studiarne la scala (Fig. 8). Anche in questo caso Rose ha proposto una possibile 'metamorfosi' dello schema originale riorganizzando gli stessi elementi modulari (Fig. 9) e presentando una variante nella quale «The same basic sense of volume and succession of planes in both planting and structure are retained, but new surface patterns, furniture, and flowers give a different feeling within the same space» Rose (1958, p. 29).

Il Morning Glory Garden (Fig. 10) è stato ideato come terrazza modulare collegata a una serie

di sentieri che conducevano a un frutteto ed era composto da pavimentazione in lastre quadrate di tre piedi quadrati, aiuole (con petunie e ipomee violacee), vasche d'acqua e un traliccio modulare. «The shojis can be removed, stored, and replaced like window screens. [...] This shelter is designed specifically to exploit blue morning-glories, which bloom in the morning but close after an hour of full sunlight. [...] This shelter can trick the blossoms into remaining open all day; the shelter is faced just north of east, with a wide projecting roof sloping up toward the morning sun. The early light

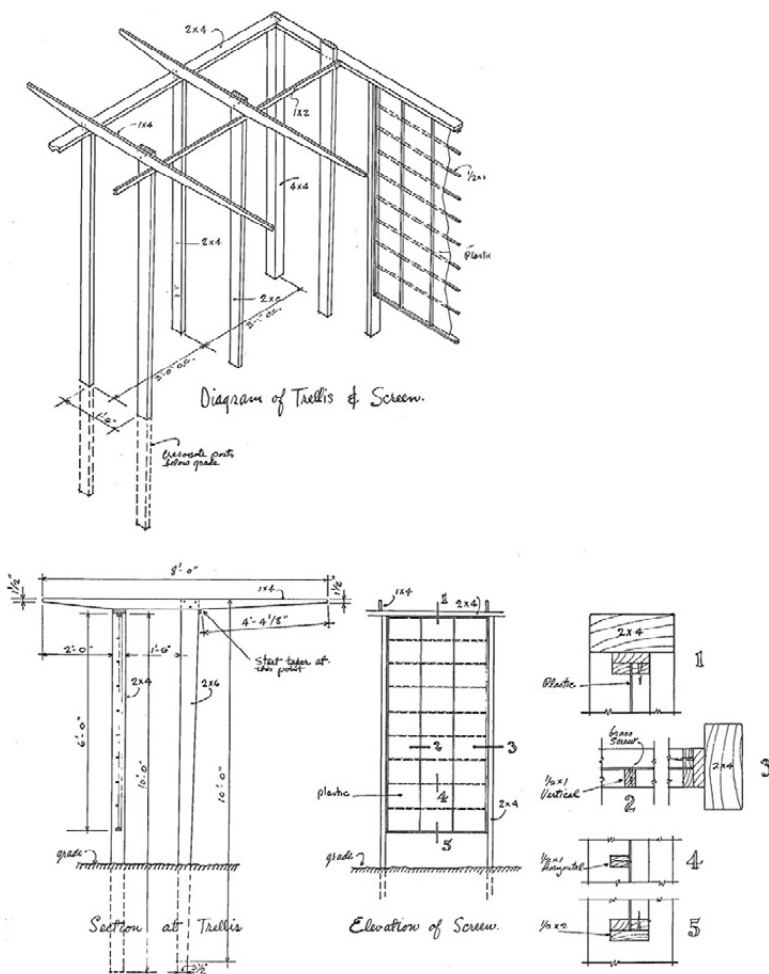
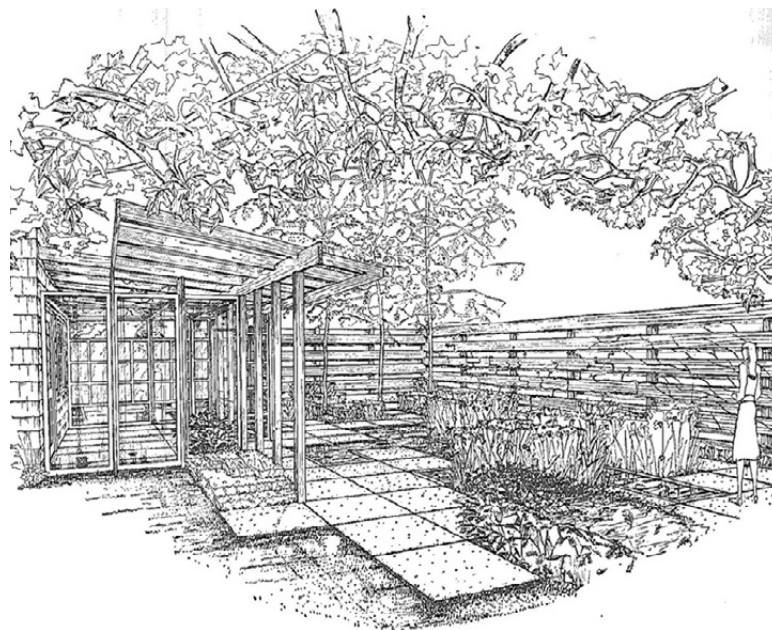
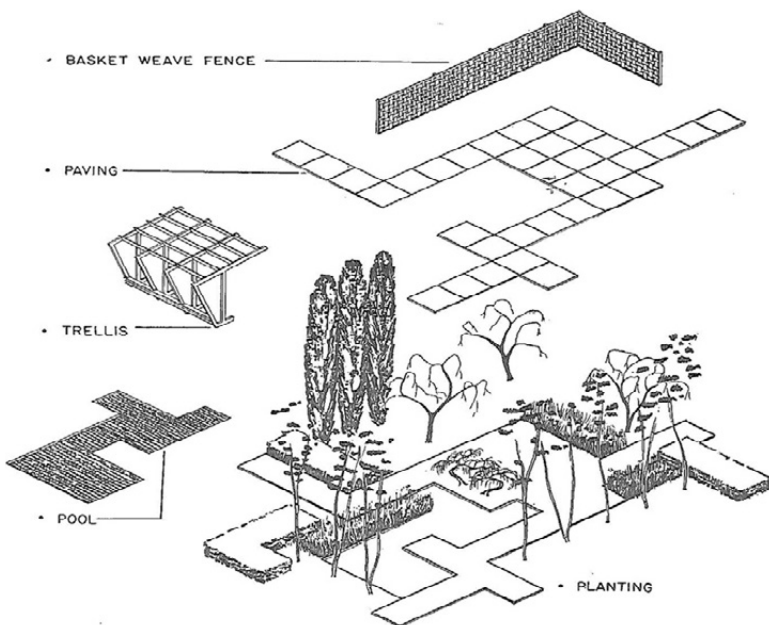


Fig. 2 | The modular parts of the garden and their interlocking relationship (source: Rose, 1958).

Fig. 3 | Suburban backyard garden in Kensington, PA. Concrete squares are interwoven with grass, plant beds, and water (source: Rose, 1958).

Fig. 4 | The Construction detail of plastic panels sandwiched between horizontal and vertical members of the shoji frames (source: Rose, 1958).

Fig. 5 | The feeling of the Tea Garden is capsulated in a space 15 by 20 feet (credit: M. Zadeli, 2023).



Fig. 6 | The Boudoir Garden (credit: M. Zadeli, 2023).

penetrates to the morning-glory bed and the flowers open. After a short exposure to the sun, they are protected from it by the roof and shojis, yet the late afternoon sun may sparkle on the pool surface; being protected, the morning-glory blooms remain open» (Rose 1958, p. 32). Anche in questo progetto l'atmosfera del giardino si è materializzata con aromi, colori e qualità tattili, mescolati a una sensazione di calore, fresco e ombra che si modificano durante le ore del giorno.

Il Fenced Garden (Fig. 11) è stato infine progettato a partire da un elemento divisorio per separare e/o schermare due aree utilizzate per scopi diversi, ad esempio una pila di pacciamatura, l'ingresso di un garage o un cortile con i panni stesi ad asciugare. Secondo Rose (1947b, p. 81) «The type of fence illustrated, with horizontal boarding applied alternately on opposite sides of round posts, will screen out an unsightly view or unwanted activity, or will break up an undesirable strong wind to form a sheltered sitting space». In questo caso Rose ha esplorato un approccio libero alla modularità grazie all'ingegnoso inserimento di una recinzione d'angolo polifunzionale (Fig. 12).

Discussione | Il modo in cui Rose concepisce la modularità è sostanzialmente diverso da quello degli altri paesaggisti del Novecento, la maggior parte dei quali ha inteso la modularità nella forma delle griglie modulari; ne sono esempio i progetti di Dan Kiley (il Miller Garden e il Kiley Garden a Tampa, Florida), di Peter Walker (il Sony Makuhari Technology Center and Toyosuna Park o il Ground Zero a New York) e di Martha Schwartz (il Rio Shopping Center o il Citadel Shopping Center) nei quali la griglia modulare ricorre a un ordine matematico per creare un movimento controllato nel paesaggio utilizzando una gamma ristretta di materiali: gruppi di alberature, aree a prato, vegetazione bassa, pavimentazione e punti d'acqua.

Si ricorre alla griglia in gran parte delle architetture del paesaggio contemporanee perché offre flessibilità e infinite possibilità di generare schemi planimetrici, ma ciò che rende originale l'approccio di Rose sono i suoi tentativi di variare l'aggregazione di una serie di moduli (di alta manifattura) per ottenere quella flessibilità che consente ai clienti di personalizzare il giardino in relazione al budget disponibile. L'approccio modulare dei giardini ideati per il Ladies' Home Journal ha l'obiettivo di mettere il ceto medio americano nella condizione di progettare con creatività il proprio giardino e disporre in modo ingegnoso i diversi elementi pre-

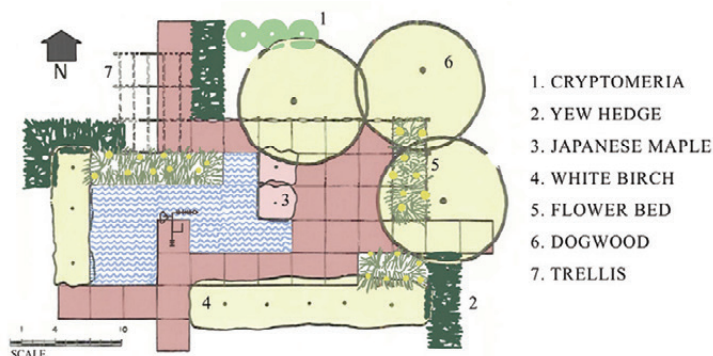


Fig. 7 | Plan of the Pool Garden (credit: M. Zadeli, 2023).

fabbricati in ragione di specifiche esigenze, non diversamente da quanto promosso dai citati progetti di Frank Lloyd Wright e Le Corbusier.²

I giardini modulari di Rose sembrano raccontare nuove storie che stimolano l'immaginazione e le emozioni (Fig. 13), caratterizzati come sono da uno specifico carattere di dinamismo legato alle diverse attività che l'essere umano espleta e alla sua variabile percezione del giardino. Il senso di ordine è espresso dalla ripetizione di unità modulari che stabiliscono una relazione dialettica tra la mente umana e lo spazio fisico del giardino: i progetti non sono un esercizio progettuale astratto, ma si basano su ciò che l'occhio può vedere e su come i fruitori esperiscono lo spazio, temi questi su cui Rose ha continuato a lavorare ben oltre l'esperienza del Ladies' Home Journal, realizzando diversi giardini suburbani negli Stati Uniti fino alla fine degli anni Sessanta (Fig. 14).

I suoi giardini modulari, una volta sperimentati, ci affasciano in un modo che ricorda la predilezione di Le Corbusier per il carattere straordinario dell'architettura e del concetto di 'spazio ineffabile'. Lo specchio nel Boudoir Garden consente una visione multidirezionale dello spazio, porta con sé una sensazione di tattilità, unifica una serie di esperienze, agisce direttamente sul movimento del corpo nello spazio ed è tridimensionalmente percepibile. In questo senso lo specchio funge da soglia che posiziona al suo interno una copia esatta del giardino e dell'osservatore che diventa cosciente; allo stesso tempo lo specchio ha il potere di ingannare, distorcere la realtà e farci allontanare da essa, operando una metamorfosi nell'osservatore e un'illusoria unione con il cosmo. Negli anni successivi Rose ha sviluppato ulteriormente le qualità psichiche e spirituali dei giardini all'interno delle forme 'ordinate' dei giardini modulari.

Un'altra qualità dei giardini modulari è la loro natura effimera, giacché il loro essere e il loro divenire sono suscettibili di una varietà di combinazioni libere, al pari della potenzialità di diventare simboli (Fig. 15). In questi giardini si riscontra una sinergia di opposti, caos e ordine, il cui schema è regolato da semplici leggi geometriche che producono unità modulari formali all'interno di una griglia accuratamente dimensionata. Il carattere informale del giardino è conferito dalla continua crescita delle piante che, seppur inserite all'interno di una strategia ordinata, costituiscono 'materia viva' con cui occorre confrontarsi quando si affronta il tema dell'incontro tra opposti. Se la forma libera si manifesta con lo snodarsi dei percorsi

usati dall'utente, l'approccio modulare e il carattere di informalità trovano la massima espressione sinergica nella recinzione d'angolo nel Fenced Garden, capace di esprimere un'idea di parete nello spazio esterno non dissimile da quella di Perriand che frammenta lo spazio interno.

Con il ricorso ad arredi e recinzioni mobili, che suggerisce un approccio simile a quello di Perriand nell'indagare la nozione di 'gesture' (Fig. 16), Rose imposta una relazione diretta tra il corpo umano e i suoi diversi movimenti con la scala, le dimensioni e le proporzioni dei giardini; parallelamente riprende la cultura del tatami giapponese e del suo stretto rapporto con le dimensioni umane e le qualità della produzione artigianale utilizzando i pannelli shoji nei tralicci che diventano pareti per stabilire relazioni ancora più intime tra l'osservatore e l'ambiente.

Infine la flessibilità dei giardini di Rose consente di personalizzare il giardino grazie all'impiego di componenti modulari interscambiabili per forma e dimensione con modalità plug-and-play, adattati per ospitare attività effimere o in funzione delle momentanee esigenze dei suoi fruitori, che possono diventare gli artefici della varietà e della complessità desiderata all'interno di un contesto dinamico e sistemico. A ben vedere i vantaggi offerti dalla modularità fanno sì che il modulo diventi uno strumento più che per gli architetti per i suoi fruitori o per la collettività.

Conclusioni | L'approccio modulare al progetto è radicato nella storia dell'architettura ed è capace di soddisfare requisiti estetici, funzionali e di qualità, ma anche nuove esigenze tra cui una realizzazione e posa in opera veloce ed economiche per gli utenti, tutti fattori che possono influenzare le decisioni progettuali. Per i vantaggi offerti il modulo può divenire uno strumento utile a esprimere valori e a rispondere a esigenze anche nel contemporaneo; prova ne è il fatto che negli ultimi decenni si è acceso il dibattito sulle potenzialità dell'impiego del modulo come strumento per agevolare la percezione, la conoscenza e l'ordine della composizione. Tuttavia la letteratura scientifica dimostra che nell'architettura del paesaggio il suo impiego è alquanto limitato.

In tale ottica l'opera di Rose ci offre una lezione illuminante sull'utilizzo strategico del modulo per realizzare numerose varianti e personalizzare lo spazio di un giardino. Seguire la strada da lui tracciata nella ricerca del corretto equilibrio tra i molteplici e variabili fattori umani e sociali nel pro-

getto del paesaggio può essere fonte di ispirazione per coloro che oggi provano a codificare un linguaggio del modulo per gli imprescindibili temi dell'equità e della sostenibilità.

The modular paradigm is a timely issue being adopted across time and places in architecture and related design disciplines. According to the Oxford English Dictionary¹, definitions of 'module' are linked to notions such as measurement, proportion, mathematics, unit, harmony, rhythm, order, tectonics, and quality. Parallel to these concepts, a different catalytic set of concepts such as globalization, equity, and sustainable development is also linked to modularity as proved from a thorough review of existing literature on the subject (Russel, 2012; Sposito, 2017).

This paper focuses on how the term 'modular' has been introduced into the field of landscape architecture following modern architecture's marking it as a powerful tool to address the challenges of the twentieth century. Modular theories and paradigms are limited in the landscape architecture discourse and the American landscape architect James C. Rose (1913-1991) has been the first one to advocate the significant role of modular concepts as a design tool. Analyzing Rose's modular lexicon and strategies dominating his modular gardens from the 1940s to the 1960s against their historical background, the corresponding societal influences, and creative meanings of the notion of module in landscape architecture are re-examined.

This allows us to see how Rose developed his ideas of module drawn on an analysis and understanding of modern and Japanese architectural approaches on the subject, and how he developed his idea of synergy between chaos (free form) and order (geometry) into his theories and works. Going beyond Le Corbusier's modular ideas and the Miesian grid, Rose's idea of 'module' as the method for organizing human space in a harmonious manner was reframed in his works and was developed in an artistic way that also portrays close relationship to Japanese ideas on this theme. Rose's modular ideas advocate a unique approach to residential garden design linking economy of means, fabrication, easy construction, flexibility, aesthetics, and customized needs. Rose considers the module as a design strategy that secures the production of high-quality gardens.

A brief overview on proportions and modular concepts as beauty in the ancient and modern era sets the theoretical framework to continue with a discussion on how modularity is linked with psychology and well-being. Next, an in-depth analysis and discussion of Rose's modular concepts and gardens offers an opportunity to delve into novel landscape ideas and processes that can prove insightful for high-quality humane landscape production. Rose's modular thinking can guide a new way of contemporary culture and practices linking high-tech fabrication possibilities, quality of construction and beauty.

Proportions and modular concepts as beauty in the ancient world | The employment of proportions as a technical and qualitative composi-

tional component governing architecture and other design forms is reiterated through time and cultures. Aspects of modularity relate to ratios and proportions, as the intent of all theories is to establish a sense of order seeking to generate ideal beauty. Three key principles are detected in the main systems of proportions developed: the repetition of key ratio throughout the design, additive properties so that the whole could be divided into different parts easily and be modified in a variety of different ways, and flexibility (Amheim, 1955).

To the Greeks, the basic unit of dimension was the diameter of the column, an architectural element that represented the perfect expression of beauty. At that time, Pythagoras developed his theory of a mathematical system of proportions, which stated the relation between some harmonic numbers and the universe. Referring to this selection of measurement as a notion of module, Heidegger praised the symbolic role of mathematics in creating social ethos in Greek architecture as part of a human attempt to create a society based on benevolence.

For Vitruvius, proportion was the principal subject of his architectural theory. He analyzed in detail the relationship of modularity, mathematics, and geometry to create beauty. The architects of the Renaissance, returned to the Greeks and advocated that architecture was mathematics translated into spatial units. Alberti recommended a set of modular recipes based on ratios, especially musical ones, suggested by the Timaeus of Plato and Pythagoras (Russel, 2012).

Early modular concepts in the Modern era |

The early twentieth century moderns considered modular concepts as part of the design / built process. Frank Lloyd-Wright's American System Built Homes (1911-16) was a modular system formed as a complete package of pre-cut parts to be shipped, akin to LEGO blocks. These home kits were sold not as individual components from a catalogue, but as a complete package by a developer organization that would guarantee a superior design quality and structural stability, also minimizing material waste and the amount of skilled labor required on site. Le Corbusier developed a new open house system called Citróhan in 1920 that was based on prefabrication and mass production. This modular approach enabled a wide array of possible façade options and floor plans, allowing plenty of control in the hands of the architect.

These early modern architectural approaches can be seen as a rather novel view of the relationship between architect and client. The architect takes responsibility for guiding the clients' needs towards a technically efficient and aesthetically pleasant solution according to their own choice and buying power. It is important to note that social responsibilities and political ideals also drove this group of forerunner architects, from the socialist ideologies of Le Corbusier to the principle – evolved from the Bauhaus School – that architecture is for everyone (Russel, 2012).

Opposite to western values, Japanese modular systems were significantly different from mechanical standardization thinking. They were controlled by the dominant role of the master carpenters, whose canonical rules were formed on their local resources and traditional apprenticeship

knowledge. Modern Japanese architects, like Ikebe Kiyoshi, were consciously opposed to Le Corbusier and focused on module as a foundation of freedom in designing as well as its social, cultural, and physiological meanings, attempting to return to the primal inquiry about man's relationship with the environment (Kuroishi, 2009, Liotta, 2017).

Modular psychology and well-being concepts

| Le Corbusier, like Vitruvius and Alberti before him, sought to reconcile biology with architecture through the medium of geometry. He further evolved the theory of modular into a modern context and created his proportional system expressed in the Modulor, an anthropometric tool based on the Golden Ratio and the Fibonacci numbers. Le Corbusier propagated a new rubric for modern architecture based on a compelling marriage of abstract geometry and anthropometric measures. Underlying the metric grid and proportions of the Modulor, hidden guiding themes and principles of his architectural stance can be unveiled such as harmonic multilayered synthesis of space and form, spatial narrative, syntax of precise relationships, sequential perception and experience of space, ineffable space, and textured space.

When individuals experience such a harmonious space, they feel the emotion and satisfaction of a well-balanced, ordered, and structured architectural composition. Such figural spaces create memorable images, and, in this sense, geometry works as a balance between mathematics and emotions. For Le Corbusier, provoking physiological sensations was a constant quest as he developed his idea of 'ineffable space', shifting the definition of architecture as clear syntax to the definition of architecture as the succession of events through the creation of precise relations.

As he described, both a physical and mental occupation of space is embedded in this notion of 'ineffable space' (Charitonidou, 2022). One understands that Le Corbusier's vision about architecture was characterized by an insistence on the importance of the social role of the architect to transform the human experience and achieve the well-being of the inhabitants. The client was regarded as an intertext of open work ready to accept a personal metamorphosis. This approach is further underpinned by Le Corbusier's close col-



Fig. 8 | Spring planting scheme and furniture in the Pool Garden (credit: M. Zadel, 2023).

laboration with French artist and furniture designer Charlotte Perriand; they worked on the design and installation of mass-produced prototype house furniture, such as desks, chairs, and cabinets, as a methodology to decorate ordinary spaces with flexible, mobile, and comfortable furniture.

After visiting Japan, Perriand recognized the importance of Le Corbusier's 'standard' as she noticed its close similarity to the Japanese 'tatami' and the close relationship between the sizes and forms of furniture to be suitable for the human dimensions. Eventually, Perriand investigated the notion of 'gesture', a harmonious contact between the object and the human body and the various human physical movements. Part of this approach was the introduction of mobile 'incorporated equipment' to get a variety of 'gestures', namely 'para-walls', causing the redefinition of the architectonic notion of 'walls' and internal space delimitation. The notion of 'equipment' also carried a psychological component in addition to the functional one, a component dismissed by Le Corbusier (Sendai, 2019).

James C. Rose's modular concepts | During the 20th century, the modular grid permeated modern landscape discourse (Pratt, 1963). Protagonists of modern landscape architecture, like James Rose and Dan Kiley, used it as an underlying armature to establish a visual relationship between depicted objects and events (Howett, 1994; Booth, 2012; Cardasis, 2017). Following architecture's modern vision, Rose, in his publications of the mid-40s through the late-50s, explored the many possibilities created by balancing space syntax and materiality with flexibility using module as a compositional strategy to address post-war technological challenges and demands (Cardasis, 2017). Rose also thought of modular concepts as a design remedy to address the dichotomy between houses and their gardens, an issue that still penetrates contemporary design practices (Biancucci, 2017; Sarro, 2017). As he

explains, Rose developed a system of modular gardens with the purpose to direct human attention to creative outdoor spaces. His modular gardens are the means to think of houses just as another obstacle in the landscape that needs to be taken care of in the pursuit of offering memorable outdoor experiences (Rose, 1958; Fig. 1).

In 1946, the Ladies' Home Journal commissioned a series of small gardens to be photographed and published in a special issue. As Rose recalls, the call of the special issue was solely looking for «[...] sensationally 'dreamy' photographs for publication» (Rose, 1958, p. 17). Rose considered this challenge as a design-build exercise to develop a modular garden prototype for small American suburban lots. Reflecting on the limited space of his modular gardens, Rose observed that «For all practical purposes, it is impossible to achieve an effective garden in less space. Yet these projects are not cramped or stuffed into their restricted areas. They have been developed freely and liberally; each is capable of expansion or even some contraction» (Rose, 1947a, p. 76).

He employed a series of calculated layouts and vertical construction systems as he explained: «I proposed a modular system of standardized garden units including trellis members, walls and space dividers, paving, pools, and plant forms. Whatever this proposal may have lacked in 'glamour', it made up for in clarity and economy; for once such a system had been worked out, the parts could be reassembled and reused in an almost infinite variety of space patterns [...]. It also gave an opportunity to study the problems of the small garden at full scale and in many variations under controlled conditions. The idea had within it the possibility of mass reproduction, which meant that it could be economically applied to the most common landscape problem – the average home grounds. But more important, it established a discipline. It is sometimes difficult to accept self-imposed disciplines; they are too often regarded as needless shackles to liberty rather than a bridge

to freedom, but it is literally impossible, in dealing with the amorphous and elusive stuff of gardens, to create an effective landscape without them» (Rose, 1958, p. 17).

Rose presented a series of seven standard elements necessary to design creative modular gardens, «[...] the trellis, 3-ft-square paving slabs, 3-ft-square planting beds, pool designed around the same module, basket-weave fencing, shojis (translucent screens), and steps composed of standard paving slabs on prefabricated risers which permit variable riser height» (Rose, 1954, p. 81; Fig. 2). An important concept introduced by Rose is the conception of these gardens as 'incidents' in the landscape, events and experiences designed to address human emotions. Several atmospheric qualities were part of Rose's modular gardens in his quest to create gardens for people's well-being. Modular units could be rearranged to offer a flexible scheme that allowed for a variety of experiences (Fig. 3). Rose unravels his thoughts when he comments on the value of creating a variety of experiences rather than static formal arrangements, «More is gained by indirection than at first meets the eye or is easy to admit. I always find it a minor miracle the way a chance remark or a quick, side-long glance can reveal a whole new world of experience» (Rose, 1958, p. 21).

To test the components encapsulated in this modular prototype, Rose took the opportunity to work on a series of drawings and mock-ups that were carried out prior to their final construction to find the correct dimensions and proportions of their structural and spatial parts (Fig. 4). All units were embedded into a precisely calculated layout. Informality was added in the whole scheme by the means of textured materials and the installation of appropriate furniture. Each module encapsulated messy details, thus contributing to a harmonious synthesis of chaos and order.

A free design process was promoted that allowed for numerous subdivisions on many different scales regarding the complexity of users' vi-

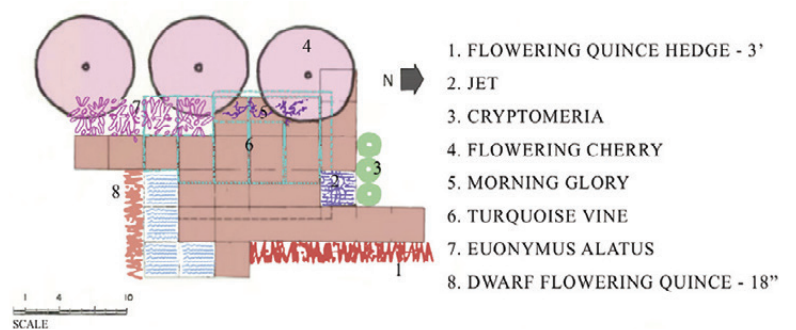
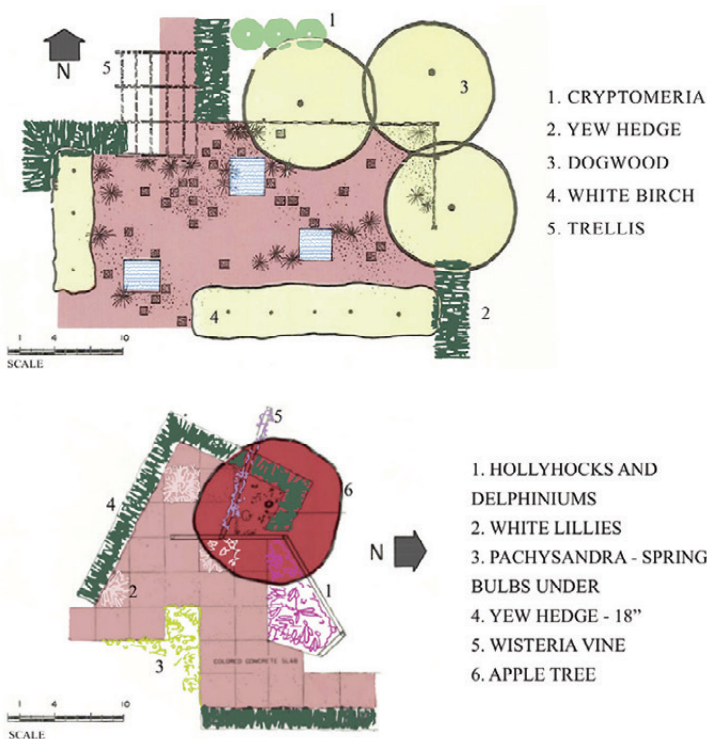


Fig. 9 | Plan of the Pool Garden, the 'Metamorphosis' (credit: M. Zadeli, 2023).

Fig. 10 | Plan of the Morning Glory Garden (credit: M. Zadeli, 2023).

Fig. 11 | Plan of the Fenced Garden (credit: M. Zadeli, 2023).

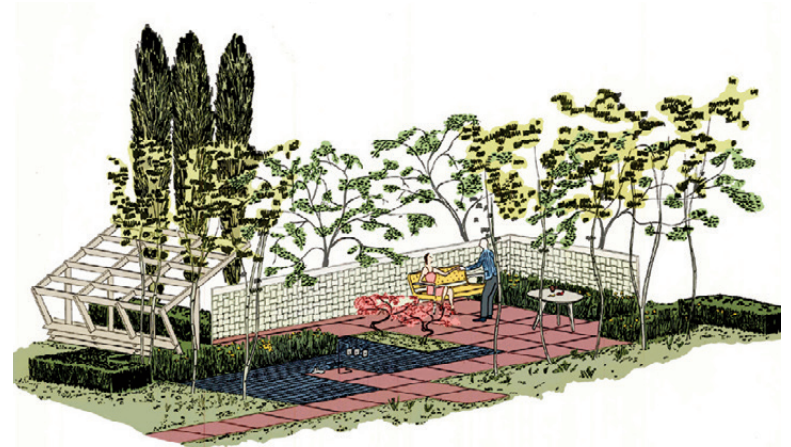


Fig. 12 | The Fenced Garden and the angular fence (credit: M. Zadeli, 2023).

Fig. 13 | View of the Pool Garden showing all modular elements (credit: M. Zadeli, 2023).

sual, spatial, and emotional needs. The modular system allowed its users to swap modules in a ‘plug-and-play’ manner, which increased the system’s flexibility and appeal by allowing impromptu decisions and creativity. Modular grids, manifested in the form of blocks of trees masses, lawn, ground cover, pavement, or water, created a visually intriguing ground pattern. Their rhythmic repetition allowed an orchestrated spatial arrangement for a wide range of possibilities.

Modular design, although seemingly a disciplined composition for assembling multiple spaces in the landscape, was at the same time a plastic and fluid design approach implying a sense of spontaneous movement within a matrix of spaces. Rose advocated the concept of «[...] modular gardens as a means of organizing identical gardens and as a method to create an efficient system of standardized design components that could be used in any garden setting» (Rose, 1958, p. 17; Booth, 2012, p. 123). By using a horizontal and vertical modular space frame in a 3 x 3 feet grid system to define all pavement areas, lawn panels, planting beds, tree locations, and site structures, Rose clearly defined the modular concept.

James C. Rose’s modular gardens | Tackling several themes on modularity, the Tea Garden, the Boudoir Garden, the Pool Garden, the Morning Glory Garden, and the Fenced Garden were published in various books and journals. Rose described the Tea Garden (Fig. 5) as a three-dimensional space giving «[...] one the sense of being within something while still out of doors»; he also referred to it as having a certain ‘feeling’ of a garden «[...] capsulated in a space 15- by 20-feet» (Rose, 1958, p. 9). The materials used are: a pattern of brick perforated with grass, pachysandra, day lilies and baby’s breath (surface); translucent shoji in removable panels, white birch stems, and the common grape vine (sides); and the modular trellis, overhanging branches, and the sky (ceiling).

The main objective of this small-size tea garden was to provide flexibility. As noted by Rose, the key features creating the armature needed towards the aim of flexibility included: the creation

of a surface that has a fabric-like quality; removable shoji panels to provide for the preferred degree of enclosure and intimacy at different times of the day or night and throughout the seasons; the three-foot modular trellis designed as an independent feature that allowed the shoji screens to be interchangeable and removable. A series of technical notes was also included to guide the construction of the modular parts of this garden.

The Boudoir Garden (Fig. 6), according to Rose, was a garden that was not designed as part of a house scheme but rather «[...] was built to be photographed, and then torn down» (Rose, 1958, p. 37). He assessed this garden as successful since, as he remarked, «[...] it served admirably the purpose of the Ladies Home Journal to demonstrate the idea of garden glamour in narcissistic terms of a boudoir [...]». The mockup describes and suggests, in a practical vocabulary, the flexibility of modular system that, far from a handicap to glamour, became a productive discipline to that end. For true glamour is in the economy of effort to effect not in shadowy illusion» (Rose, 1958, p. 37).

Precast concrete squares were embedded and at points interrupted by a small size water feature. A dressing room, boudoir, and a bath were the main functional areas of the garden reminding us of ancient oriental living. A translucent wall in a modular arrangement as well as a curtain across the boudoir and bath ensured the privacy of this garden. The weeping Mountain Ash and the trellis contributed to the feeling of intimacy. It is worth noting that it is furnished with a boudoir table with mirror and chair, and crocheted hammock, all of which are very carefully selected and placed to create a «[...] relaxed and comfortable living» (Rose, 1958, p. 37).

The Pool Garden (Fig. 7) is a 20 x 30 feet scheme that gives a sense of ‘an enormous space’ while also provides room for a ‘metamorphosis’, demonstrating «[...] the range and flexibility of a modular system in developing an idea from its inception to final form and subsequent reinterpretation» (Rose, 1958, p. 24). Two plan schemes, ‘incidents’, were proposed to showcase how the

garden plan can be transformed using the same components in varying arrangements and interlocking relationships. The Pool Garden is «[...] designed as a casual garden opening directly from the kitchen, living room, or bedroom» and, as Rose (1958, p. 27) proposed, «[...] more than 50 of them could be fitted into one acre, or one could be adopted to the smallest suburban lot».

The main modular parts were the angular trellis, the 3-foot square paving blocks of precast and colored concrete, the 3-foot square planting flower beds, a 4-foot-high basket-weave fence, and a standard reflecting pool 3- by 3-feet. Rose (1958, p. 24) suggested that «[...] the planting beds can be varied for seasonal effect by lifting the paving sections and setting flowers in their place. When the effect is past, the flowers can be removed, and the paving restored». Sketches and plans were developed from a scale mock-up of the garden. Proposed garden furniture was carefully arranged as an integral part of the whole scheme and was used to study the scale (Fig. 8). A ‘metamorphosis’ of the original scheme happened when Rose proposed a reinterpretation of this garden plan with the employment of the same modular parts (Fig. 9). Rose (1958, p. 29) remarked, «The same basic sense of volume and succession of planes in both planting and structure are retained, but new surface patterns, furniture, and flowers give a different feeling within the same space».

The Morning Glory Garden (Fig. 10) is designed as a modular terrace linked with a free-flowing system of paths that leads to an orchard. It was composed of a system of 3-foot square paving blocks, flower beds (petunias and morning glories), a pool, and an angular trellis. Rose (1958, p. 32) noted, «The shojis can be removed, stored, and replaced like window screens. [...] This shelter is designed specifically to exploit blue morning-glories, which bloom in the morning but close after an hour of full sunlight. [...] This shelter can trick the blossoms into remaining open all day; the shelter is faced just north of east, with a wide projecting roof sloping up toward the morning sun. The early light penetrates to the morning-glory bed and the flowers open. After a short exposure to the sun, they

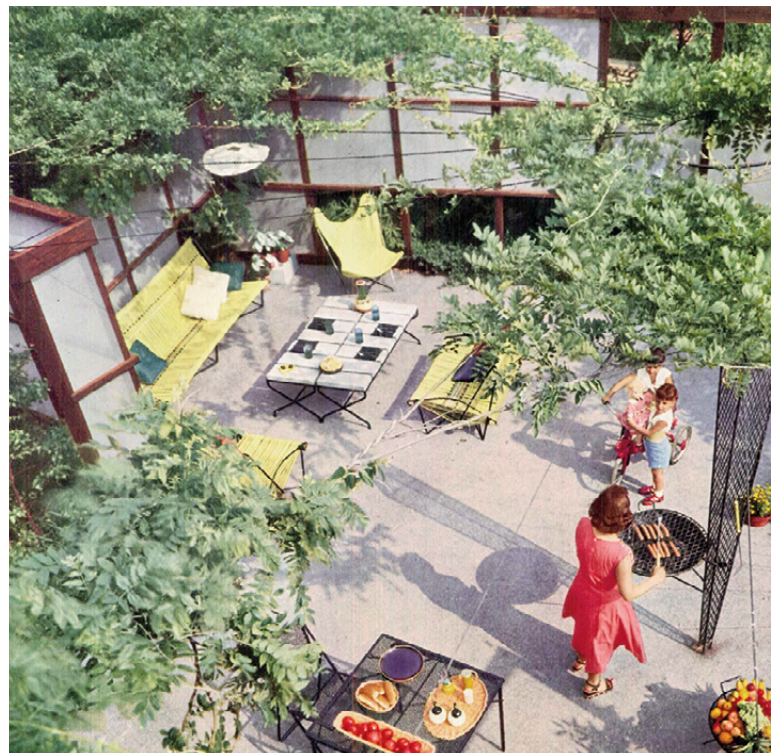


Fig. 14 | Outdoor dining in the Mineola Garden in Long Island, NY (source: Rose, 1958).

Fig. 15 | The Mineola Garden at work and people at play: a memorable outdoor experience (source: Rose, 1958).

Fig. 16 | Suburban Garden for a typical builder's house in South Miami (source: Rose, 1958).

are protected from it by the roof and shojis, yet the late afternoon sun may sparkle on the pool surface; being protected, the morning-glory blooms remain open». Rose created an atmosphere composed of common materials: aromas, colors, and tactile qualities, blend with a feeling of warmth, coolness and shade alternating during the daytime, an ever-changing pattern of life.

The Fenced Garden (Fig. 11) is «[...] designed around the barrier which must often be erected between two areas used for different purposes. To screen off a mulch pile, garage entrance, drying yard, children's sandbox, etc., a fence may be needed. The type of fence illustrated, with horizontal boarding applied alternately on opposite sides of round posts, will screen out an unsightly view or unwanted activity, or will break up an undesirable strong wind to form a sheltered sitting space» (Rose, 1947b, p. 81). Rose explored a free approach of modularity because of his ingenious juxtaposition of rectilinear and angular geometries expressed in the form of the fence that served many purposes (Fig. 12).

Discussion | The way Rose thinks of modularity is remarkable and different from all other landscape architects of the twentieth century, most of which engaged modularity in their projects in the form of modular grids. Application of ideas on

modular grids can be observed in the projects of Dan Kiley (e.g., The Miller Garden, the Kiley Garden in Tampa, Florida), Peter Walker (e.g., Sony Makuhari Technology Center and Toyosuna Park, Ground Zero in New York), and Martha Schwartz (e.g., Rio Shopping Center, Citadel Shopping Center). In these projects, the modular grid employs a mathematical order to use a limited palette of materials in the form of blocks of tree masses, lawn, ground cover, pavement, and water to establish a controlled movement in the landscape.

The grid is employed to provide flexibility and infinite possibilities to generate plan layouts in most contemporary landscape architectural practices. What primarily makes Rose's approach unique is his experimentation in linking high-quality fabrication of a series of well-designed modules to allow flexibility to customize the garden space in response to individual budgets. The Ladies' Home Journal modular gardens were conceived as a method to guarantee creative design and intelligent arrangement of prefabricated components for the average American house owner in the same way Frank Lloyd Wright and Le Corbusier formed similar concepts.²

Modular gardens designed by Rose seem to tell a novel story that excites human imagination and emotions (Fig. 13). He wanted to make spaces that create a special kind of coherence due to the

sequence of movement as determined by human functions, and the psychological perception of the garden. Order is expressed using repetitive modular units establishing a dialectic relationship between the human mind and the garden. In this sense, order acts like a metaphor in which this relationship evokes people's past experiences and stirs their emotions. Modular gardens designed by Rose are not just an abstract planning exercise but are based on the user's experience and thus are frequently based on what the eye can see and how the user experiences the garden space. Rose continued to work on modular garden themes well after the Ladies' Home Journal experiment in a wide range of suburban gardens across the States until the late 60s (Fig. 14).

Rose's modular gardens once experienced, captivate us in a way reminiscent of Le Corbusier's stance for architecture's transcended attributes and his notion of 'ineffable space'. The mirror in the Boudoir Garden enables peripheral multidirectional vision and incorporates a sense of tactility. It establishes the unity of a series of experiences, directly impacts the body's movement through space, is perceivable in three dimensions, and gives meaning to the resultant movement. In this sense, the mirror acts as a threshold that positions inside it an exact copy of the viewer and the garden. The viewer becomes aware of

oneself. At the same time, the mirror bears the power to deceive, depart from and distort reality, allowing for a metamorphosis of the viewer to occur, and an illusionary connection to the cosmos to be revealed. Rose developed further his concept on the mental and spiritual qualities of gardens in later years, but it is interesting to observe that he found room to explore it within the ordered forms of his modular gardens.

Another component of Rose's modular gardens refers to their ephemerality since they allow being and becoming in a variety of non-fixed arrangements. Therefore, they hold the potential of becoming a symbol (Fig. 15). A synergy of opposite sides, chaos and order, is detected in Rose's modular gardens. Their layout is led by simple geometry laws that produce formal modular units embedded in a calculated grid layout. Informality is characterized by plants' growth and change while fitted into an ordered strategy, a living material that needs to be taken into consideration when addressing the blending of the two polarities. Free form is also suggested in the form of paths leading the viewer from the modular gardens to the other parts of the garden. Rose also marries his initial modular concept with informality when he designs the angular fence in the Fenced Garden. The fence also is a vivid exploration of Rose to the idea of wall as a spatial element of design in a similar way to Periard's redefinition of the architectonic notion of wall.

Next, the use of mobile furniture and fence suggests a similar approach to that of Periard's

stance on investigating the notion of 'gesture' (Fig. 16). By incorporating pieces of furniture in his modular gardens, Rose directly relates the human body and various physical movements to the scale, size, and proportions of the gardens. Parallel to the arrangement of walls and furniture to celebrate the notion of human gesture, Rose further develops a deep appreciation to the Japanese 'tatami' and its close relationship to the human dimensions and craftsmanship. Shoji screens become walls and parts of the trellises channeled into ordered forms to establish even more intimate psychological relationships between the observer and the environment.

Finally, Rose's modular gardens allow flexibility to customize the living garden space for the individuals. The garden modular components can be swapped in a 'plug-and-play' manner by other component variations of similar or different sizes and shapes within a garden, adjusted to accommodate ephemeral activities, and even completely rearranged in response to changes in people's lives. With modular garden spaces, the users can become the drivers of the module's variety and desired complexity within a dynamic and systemic context. In effect, the advantage of modularity allows the module definition to shift from architects to its users / community.

Conclusions | Modular design thinking and construction are embedded in age-old perceptions as discussed in this paper and can satisfy aesthetic, functional, and quality requirements but

also new requirements, fast building process, immediate installation, and an understanding of the economics and client-related benefits which influence design decisions. Such an attitude might entail the potential to think of 'module' as a way of making environments related to today's society's current values and needs. A variety of modular discourses have arisen in the past few decades considering the 'module' as a way of seeing, knowing, and ordering. However, the findings indicate that the modular paradigm is being adopted in limited cases in contemporary landscape architecture projects.

Understanding Rose's concept of modularity as a disciplined strategy that can offer numerous variations can customize the garden space for its residents might prove to be an insightful lesson. Following Rose's attempt to rediscover the landscape architect's role in taking and inventing a balance between multiple and flexible human and social factors in landscape architectural production might also provide inspiration to current voices attempting to reinvent and codify the idea of modular lexicon for equity and sustainability.

Acknowledgements

All drawings of this contribution shown in the figures are created by M. Zadel, from the Ringling College of Art and Design in Sarasota (Florida, USA), who closely collaborated with the Author and diligently worked on their digital reproduction based on the original drawings and photos published in James C. Rose publications.

Notes

1) See discussion on the origin of the term 'module' in Russel, 2012 (pp. 260-262).

2) Mass-customized modular housing projects, as advocated by Frank Lloyd Wright and Le Corbusier, failed to permeate the making of architecture in the same way that Rose's modular landscape grammar and standards did not find any application in the construction industry. One landscape project that is noteworthy to mention is Martha Schwartz's Citadel Shopping Center in LA: this project has a strong link to the use of prefabricated materials (checkerboard colorful paving, and tire-shaped rings which surround the palm trees) and is designed by the landscape architect to create an attractive design at a low cost of construction. However, today's digital technological world and AI opportunities these modular concepts might emerge as a new type of design, manufacturing, and construction enterprise.

References

- Arnheim, R. (1955), "A review of proportion", in *The Journal of Aesthetics and Art Criticism*, vol. 14, issue 1, pp. 44-57. [Online] Available at: doi.org/10.2307/426640 [Accessed 19 October 2023].
- Biancucci, A. (2017), "Terra e Cielo – Architetture di Melluso nel Paesaggio Mediterraneo | Earth and Sky – Architectures of Melluso in the Mediterranean Landscape", in

Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design, vol. 2, pp. 173-180. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/2232017 [Accessed 2 November 2023].

Booth, N. (2012), "The Grid", in *Foundations of Landscape Architecture – Integrating Form and Space Using the Language of Site Design*, John Wiley and Sons Inc., Hoboken (NJ), pp. 107-138. [Online] Available at: academia.edu/33145128/_Norman_Booth_Foundations_of_Landscape_Architectu_BookZZ_org_ [Accessed 2 November 2023].

Cardasis, D. (2017), *James Rose – A Voice Offstage*, The University of Georgia Press, Athens (Georgia).

Charitonidou, M. (2022), "Le Corbusier's Ineffable Space and Synchronism – From Architecture as Clear Syntax to Architecture as Succession of Events", in *Arts*, vol. 11, issue 12, pp. 1-29. [Online] Available at: doi.org/10.3390/arts11020048 [Accessed 19 October 2023].

Howett, C. (1994), "Modernism and American Landscape Architecture", in Treib, M. (ed.), *Modern Landscape Architecture – A Critical Review*, MIT Press, Cambridge (MA), pp. 18-35.

Kuroishi, I. (2009), "Mathematics for/from Society – The Role of the Module in Modernizing Japanese Architectural Production", in *Nexus Network Journal*, vol. 11, issue 2, pp. 201-216. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00004-007-0087-1 [Accessed 19 October 2023].

Liotta, S.-J. A. (2017), "Architettura e Natura in Giappone – Nishizawa, Kuma e Fujimoto | Architecture and Nature in Japan – Nishizawa, Kuma and Fujimoto", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 2, pp. 165-172. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/2222017 [Accessed 2 November 2023].

Pratt, R. (1963), *Ladies' Home Journal Book of Landscaping and Outdoor Living*, Grosset & Dunlap Publishers, New York.

Rose, J. C. (1958), *Creative Gardens*, Reinhold Publish-

ing Corporation, New York.

Rose, J. C. (1954), "A Contemporary American House – The Spatial Discipline", in *Progressive Architecture*, issue 12, pp. 114-119. [Online] Available at: usmodernist.org/PA/PA-1954-12.pdf [Accessed 19 October 2023].

Rose, J. (1947a), "Modular Gardens", in *Progressive Architecture*, vol. 28, issue 9, pp. 76-80. [Online] Available at: usmodernist.org/PA/PA-1947-09.pdf [Accessed 19 October 2023].

Rose, J. (1947b), "Modular Gardens – Part II", in *Progressive Architecture*, vol. 29, issue 10, pp. 81-84. [Online] Available at: usmodernist.org/PA/PA-1947-10.pdf [Accessed 19 October 2023].

Russel, A. (2012), "Modularity – An Interdisciplinary History of An Ordering Concept", in *Information & Culture | A Journal of History*, vol. 47, issue 3, pp. 257-287. [Online] Available at: jstor.org/stable/43737345 [Accessed 19 October 2023].

Sarro, A. (2017), "Architettura e Paesaggio nella Città Contemporanea | Architecture and Landscape in the Contemporary City", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 2, pp. 141-148. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/2192017 [Accessed 2 November 2023].

Sendai, S. (2019), "The Conception of 'Equipment' by Charlotte Periard – Cross Over Between Le Corbusier and Japan", in *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 18, issue 5, pp. 430-438. [Online] Available at: doi.org/10.1080/13467581.2019.1678473 [Accessed 19 October 2023].

Sposito, A. (2017), "Architettura e Natura | Architecture and Nature", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 2, pp. 3-10. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/212017 [Accessed 19 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	11 September 2023
Revised	12 October 2023
Accepted	26 October 2023
Published	31 December 2023

TIPOLOGIA, TOPOGRAFIA E TETTONICA Categorie e modelli per il progetto urbano

TYOLOGY, TOPOGRAPHY AND TECTONICS Categories and models for the urban project

Santiago Gomes

ABSTRACT

Se una 'nuova urbanistica' esisterà – scriveva Koolhaas nel 1995, dopo averne dichiarato la morte – consisterà in uno scenario di incertezza. Mutazione, imprevedibilità e indeterminazione caratterizzano la questione urbana contemporanea e vanno generando, superato lo spaesamento iniziale, sviluppi disciplinari che procedono alla ricerca di forme ibride di pianificazione, sempre meno conformative e prescrittive. Inserendosi in questo processo, che richiede una ridefinizione degli strumenti e delle categorie di lettura, progetto e gestione delle trasformazioni, il contributo propone la costruzione di un quadro teorico-metodologico fondato sull'attualizzazione dei concetti di Tipologia, Topografia e Tettonica, avanzando ipotesi operative concrete per la regolamentazione prefigurazione e attivazione delle trasformazioni in un'ottica inclusiva transdisciplinare.

If there is to be a 'new urbanism' – Koolhaas wrote in 1995, after declaring its death – it will be the staging of uncertainty. Mutation, unpredictability and indeterminacy characterise the contemporary urban question and are generating, after the initial bewilderment, disciplinary developments that proceed in search of hybrid forms of Planning, less and less conformative and prescriptive. This contribution – placed inside this process, which calls for a redefinition of the tools and categories of reading, design, and management of transformations – proposes the construction of a theoretical-methodological framework based on the actualisation of the concepts of Typology, Topography and Tectonics and advances concrete operational hypotheses for the regulation, prefiguration and activation of transformations from an inclusive transdisciplinary perspective.

KEYWORDS

tipologia, topografia, tettonica, pianificazione strutturale, forma urbana

typology, topography, tectonics, structure planning, urban form



Santiago Gomes, Architect and PhD, is a full-time Assistant Professor at the Department of Architecture and Design of the Politecnico di Torino (Italy), educated at the Universities of Buenos Aires, Lisbon, and Turin. He is a member of the Joint Research Unit 'Transitional Morphologies' (Southeast University of Nanjing – Politecnico di Torino). His research and practice focus on housing questions and the relationship between architecture, the city and society. E-mail: santiago.gomes@polito.it

Il dibattito intorno all'incertezza che caratterizza, da più di un quarto di secolo, la condizione contemporanea (Stanganelli et alii, 2020) e sulle possibili modalità con cui la pianificazione può e deve agire nel governare i processi che investono le nostre città, mette al centro un'altra questione, quella della definizione di strumenti, metodologie in grado di tutelare le finalità e gli obiettivi che, attraverso il Piano, le comunità stabiliscono secondo i meccanismi previsti dall'ordinamento giuridico-politico (Mazza, 2010). Nell'attuale panorama l'instabilità, la celerità delle mutazioni (Union Internationale des Architects, 1996) e la mancanza di prevedibilità minano la struttura dell'urbanistica tradizionale, basata sulla capacità di fare previsioni e proiezioni affidabili (McLoughlin, 1969; Faludi, 1973; Chadwick, 1978; Salzano, 1995), e il sistema di regole rigide della Pianificazione tradizionale di tipo prescrittivo si dimostra inadeguato in un dibattito che va acquisendo sempre più urgenza, dimensioni e portata maggiore (Stanganelli and Bruni, 2017).

Il superamento del modello conformativo-prescrittivo (Salzano, 2008) del Piano (ex L. 1150/42) dà spazio alla lenta ma persistente sperimentazione di forme di pianificazione performativa, strategica, strutturale e operativa (Galuzzi, 2023) che, anche grazie all'apporto del dibattito internazionale e delle politiche europee (Janin Rivolin, 2008; Nadin et alii, 2018), stanno modificando la relazione tra i Piani e i meccanismi normativi di attuazione. Si tratta di immaginare sistemi flessibili e adattivi, per l'inclusione, l'equità e la sostenibilità (ambientale e sociale) delle trasformazioni proposte.

Sulla scorta delle esperienze italiane e mediante il trasferimento di conoscenze provenienti da contesti diversificati – dalla Pianificazione anglosassone e nordeuropea alle pratiche di rigenerazione urbana, fino ai progetti di ri-urbanizzazione degli insediamenti informali (Cortinovis and Geneletti, 2020; Carta, Gisotti and Lucchesi, 2022; Fernández Castro and Jáuregui, 2005; Fernández Castro, 2007) – il paper indaga sulla possibilità di strutturare l'azione regolamentativa, prefigurativa e attuativa a partire dal progetto e per il progetto, lavorando sull'articolazione di tre concetti concorrenti nel processo di costruzione dello spazio urbano: Tipologia, Topografia e Tettonica. Temi che, mentre si riferiscono a processi e meccanismi di produzione materiale, intrinsecamente legati alla condizione fisica delle nostre città, richiamano, e contengono al loro interno, una molteplicità di pratiche e valori sociali e collettivi: dalla memoria all'identità, dalla cultura materiale alla descrizione, alla definizione e alla ridefinizione del rapporto tra gli uomini e le donne e i loro territori (Doberti, 2008; Berlanda, 2014; Frampton, 1995).

L'operatività e l'efficacia del progetto urbano richiede che le discipline del progetto, dalla Composizione (architettonica e urbana) alla Tecnologia, dalle Strutture alla Rappresentazione, dalla Geomatica alla Storia, si dotino di strumenti e metodologie in grado di contribuire ai processi, indirizzando, guidando, assecondando ma anche, e soprattutto, coinvolgendo e attivando soggetti e stakeholder nella costruzione di alternative inclusive e innovative di trasformazione dei territori (Triscioglio, 2021; Lepretti and Alfaro d'Alençon, 2018). Bisogna ridefinire categorie, reinventare dispositivi e apparati che ci permettano di leggere, interpretare, progettare, prefigurare e rendere pos-

sibile la governance, includendo le variegata sfaccettature che la condizione urbana ha assunto in questi anni (Secchi, 2013).

Concretamente, lavorando su Tipologia, Topografia e Tettonica si propone la costruzione di abachi e cataloghi che, raccogliendo modalità, atteggiamenti e soluzioni specifiche ricorrenti, possano servire a guidare l'azione di progetto (nelle componenti materiale e immateriale) attraverso la definizione di sistemi di regole, indirizzi e linee guida. Non si tratta di costruire manuali, ma di riflettere intorno alle modalità in cui la città si trasforma, mettendo in luce le dinamiche che si celano all'interno dei processi, lavorando sull'identificazione di regole e modelli (Choay, 1996) di costruzione e modificazione della forma della città (Triscioglio et alii, 2021) e recuperando la doppia valenza del concetto di modulo di Giulio Carlo Argan in quanto sintesi ed espressione culturale e contemporaneamente strumento di misurazione, di valutazione e monitoraggio qualitativo.

Le nuove tecnologie di rilievo digitale, la possibilità di gestione di ingenti quantitativi di dati georeferenziati e l'introduzione della IA offrono, in tal senso, un supporto eccezionale e aprono a scenari operativi davvero promettenti (Candito et alii, 2019; Doria, 2022; D'Ambrosio et alii, 2022; Magliocco and Canepa, 2022) per comprendere, prefigurare e governare efficacemente la città nel processo di trasformazione e transizione per il raggiungimento durevole e inclusivo degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (UN General Assembly, 2015).

Premessa metodologica | L'introduzione di margini di flessibilità entro una visione strutturale-strategica e operativa del Piano deve essere supportata dal progetto in quanto dispositivo di lettura, interpretazione e telaio possibilante delle trasformazioni. A partire dai concetti base (Tipologia, Topografica, Tettonica) si propone la costruzione di un metodo per approfondire la conoscenza delle città, registrando i processi di transizione (Triscioglio et alii, 2021), evidenziando l'emersione delle forme e spazi che la comunità convalida, esercita e riconosce mediante la produzione di modelli operativi.

Di fronte, infatti, a ciò che Secchi (2013) chiama la 'nuova questione urbana', la ricerca di metodologie che possano contribuire all'attuazione inclusiva delle trasformazioni costituisce una delle questioni più delicate del processo di rinnovamento della pianificazione. In tal senso la proposta avanzata si focalizza sulla centralità dello spazio fisico della città e dei meccanismi che lo generano, identificando nelle categorie di lettura e progetto regole e prefigurazioni, 'moduli', quali strumenti utili al superamento di una visione statica e lineare del costruito, includendo le pratiche e gli attori che li influenzano e li conformano.

Per fare ciò il paper propone una contaminazione tra linee di ricerca che, negli sviluppi disciplinari dell'Architettura e dell'Urbanistica, raramente dialogano in maniera feconda. Da tempo, infatti, le due discipline hanno consolidato approcci metodologici finalizzati alla conoscenza della città e del territorio discordanti e hanno delimitato ambiti esclusivi per l'esercizio del progetto, qualificando domini culturali e interessi spesso incompatibili (Leva, 2017). In questo quadro risulta indispensabile esplicitare e delimitare i termini del

significato che Tipologia, Topografia e Tettonica assumono nel presente scritto, inquadrandoli nel contesto culturale in cui si inseriscono o dai quali derivano.

Definizioni | Benché, sin dal titolo, la triade di concetti rimandi immediatamente agli studi sulla morfologia urbana, alla tradizione muratoriana italiana ma anche agli sviluppi in ambito anglo-tedesco elaborati da Conzen (2012), il quadro teorico che si propone attraverso la ridefinizione e riproposizione dei concetti è la capitalizzazione di apporti (solo apparentemente antagonisti) provenienti dall'intenso dibattito italiano scaturito dalla pratica teorica e progettuale di Vittorio Gregotti (1966) e Bernardo Secchi (1997) ma anche di sviluppi più autonomi e 'periferici' elaborati in ambito latinoamericano, sia in quanto costruzione di apparati teorici che di proposte metodologiche (Doberti, 2008; Fernández Castro, 2011) basate su esperienze applicate concrete (Jáuregui, 2013; Fernández Castro and Jáuregui, 2005). Si evidenzia come questi contributi abbiano in comune un interesse per la definizione di strumenti operativi che scaturiscono dal riconoscimento, nelle ricorrenze e ripetizioni di elementi, di dispositivi e atteggiamenti che conformano lo spazio, a partire dai quali procedere alla prefigurazione di proposte che includono e articolano tradizione, limiti, peculiarità, desideri e aspirazioni delle società e dei luoghi della pratica.

Tipologia | Nella visione proposta la nozione di Tipologia è intesa in senso lato, ampio, poiché include l'idea muratoriana di tipo in quanto forma strutturale. Per Muratori, infatti, il tipo non è un concetto astratto (Moneo, 1978) bensì un elemento che consente di comprendere le dinamiche di sviluppo della forma urbana e della sua trasformazione, mostrando come nel tipo edilizio si materializzino l'insieme di limitazioni tecniche, economiche e sociali nei diversi momenti storici. Il concetto contiene la relazione dialettica con la storia che stabilisce il tipo che accomuna gli sviluppi dell'approccio tipo-morfologico di Caniggia e Maffei (1991), di Maretto (1993) e poi di Aymonino (1970) e Rossi (1966) con l'operazione compiuta da Bernardo Secchi (2015) per il quale, nella caratterizzazione degli spazi aperti e del costruito, nei modi attraverso cui essi si accostano, nell'individuazione di sequenze specifiche, allineamenti e reticoli strutturali e perfino nei materiali edili impiegati o nel riconoscimento di linguaggi ricorrenti, si riviene un sistema di 'regole' che costituiscono, in qualche modo, una evoluzione del concetto di tipo e gli elementi con cui costruire il progetto di modificazione della città (Moschini, 2014).

Un ulteriore apporto alla definizione del quadro concettuale è rappresentato dal contributo di Roberto Doberti che, ancorato alla produzione teorica sviluppata in ambito europeo appena richiamata, arricchisce (mediante uno sguardo alla specificità della realtà locale latinoamericana) il quadro interpretativo per la comprensione della realtà attraverso la costruzione di due livelli di lettura e classificazione della condizione urbana, identificando 'tipologie configurative' e 'tipologie semantiche' quali elementi concorrenti rinvenibili nei modi in cui la forma e le pratiche urbane si sono sviluppate, articolando caratteri morfologici ricorrenti con i significati che tali forme assumono

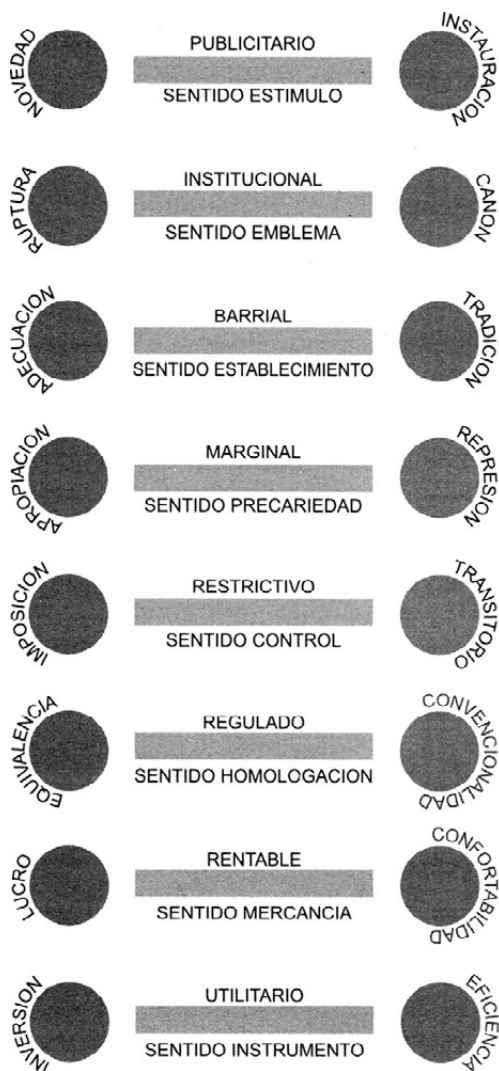


Fig. 1 | Semantic typologies scheme by Roberto Doberti (credit: R. Doberti, 1998).

nella strutturazione e organizzazione dello spazio della città (Doberti et alii, 1998; Doberti, 2008, 2011; Fig. 1).

Topografia | Il terreno condiziona e influenza l'azione e i meccanismi con cui la città si genera. Il Tipo si trasforma, muta e si modifica proprio nella relazione con la topografia. In tal senso si propone un ampliamento del significato che esso assume negli studi morfo-tipologici italiani e francesi (Caniggia, 1976; Panerai, Depaule and Demorgon, 1999) basati su un approccio topografico meccanicistico e deterministico nei quali è sostanzialmente la struttura orografica a definire i percorsi dell'urbanizzazione, in un processo temporale astratto e universale: una visione territorialista estende lo sguardo alla relazione di un insieme più ampio di componenti ed è riferita a una regione geografica specifica, intesa come area in cui si è sedimentata una solida cultura insediativa (Poli, 2017). Si tratta di restituire al termine un ruolo attivo per la modificazione del territorio, per la sua valutazione, in quanto strumento per riconoscere il contesto storico e geografico e in quanto componente di un paesaggio antropogeografico capace di contenere e suggerire le proprie modificazioni (Gregotti, 2011): un ruolo per la topografia che sta alla base delle idee di 'principio insediativo' e 'progetto di suolo', diffusamente sperimentate da Secchi (Fini, 2017).

Tettonica | Nel concetto di Tettonica trovano sintesi le due nozioni precedenti. Il termine rimanda alla parte della geologia che si occupa della deformazione della crosta terrestre, del suolo, dei meccanismi che modificano la morfologia del terreno. Tettonica è però anche l'insieme dei sistemi tecnici che rendono possibile la costruzione dell'architettura, che ne determinano la forma e la originano. Tettonica è anche 'arte della connessione' di elementi non solo architettonici, tecnica di assemblaggio, regola e meccanismo. A livello urbano l'analisi dei caratteri tettonici può essere intesa come la comprensione delle leggi pratiche che stanno alla base della sua costruzione, nella visione della continuità della tradizione. Per costruzione, in questo senso, non si intendono solo le leggi strutturali e tecnologiche, ma anche la cultura, quindi i principi fondanti la stessa morfologia della città. In quest'ottica è significativo che, proprio nel suo studio sulla tettonica, Kenneth Frampton (1995) affronti il tema del fondamento del progetto ponendo l'accento sulla relazione tra Topos, Typos and Tectonics, tipologia insediativa, tipologia edilizia e tipologia strutturale, quindi sulla relazione tra aspetti tecnici e simbolici, tra condizioni empiriche di produzione e tra ragioni (funzionali, economiche, sociali) e storia (Gregotti, 1999).

Proposta metodologica | Sulla base dei concetti sviluppati si propone la costruzione di un metodo strumentale a supporto dell'azione di pianificazione, lavorando sui tre livelli concorrenti per la lettura, il progetto e il governo delle trasformazioni. Si tratta di definire, classificare e sistematizzare gli esiti di un rilevamento da condurre sulla 'città fisica' (Secchi, 2000) a partire dalla convinzione che la conoscenza di un luogo avviene utilizzando gli strumenti del progetto e le sue tecniche (Viganò, 2010).

In particolare, attraverso l'indagine tipologica è possibile comprendere, catalogare e identificare ricorrenze per descrivere le dinamiche e costruire ipotesi di progetto (Fig. 2). Dalla lettura topografica deve emergere una approfondita conoscenza ambientale e scaturire, mediante la messa in relazione con le dinamiche di transizione e variazione delle tipologie, un abaco di soluzioni e di dispositivi di modificazione sul piano territoriale e paesaggistico-ecologico e a livello spaziale, sia del costruito che dello spazio pubblico (Figg. 3, 4). La ricerca tettonica mette in relazione meccanismi ricorrenti e strutturanti dello spazio urbano (Fig. 5), focalizzandosi sull'azione degli agenti che influenzano le mutazioni sul piano culturale, sociale ed economico e misurando l'impatto sulla conformazione fisica della città (Fig. 6).

Nello specifico si prevede la compilazione di abachi estesi e sintetici contenenti l'insieme classificato dei risultati desunti da accurati rilevamenti e il riepilogo organizzato degli elementi ricorrenti riscontrati. Tali compendi, mettendo in evidenza la varietà dei fatti urbani secondo i tre temi, proprio perché concentrati sui meccanismi di produzione, si configurano come possibili codici (insiemi di regole) e come indirizzi e prefigurazioni evocative specifiche e singolari, ma anche generiche e aperte (Fini and Pezzoni, 2010) per consentire un'attuazione efficace e diretta delle componenti operative dei Piani e per attivare la comprensione e stimolare le elaborazioni strutturali e strategiche.

L'insieme che scaturisce da queste analisi permettere di costruire un possibile atlante dinamico,

grafico e concettuale da integrare negli elaborati del Piano (Figg. 7, 8). La sua disponibilità potrà fornire supporto sia alla governance, per la valutazione della coerenza degli interventi rispetto agli obiettivi del Piano, sia a stakeholder e progettisti, in quanto mediante l'esposizione organizzata delle ricorrenze risulteranno chiari, sotto il profilo morfologico, i margini fisici di modificazione del tessuto urbano, del territorio, del paesaggio; inoltre costituirà un valido dispositivo di empowerment e coinvolgimento delle comunità nella trasformazione dell'habitat.

Il metodo interpretativo-progettuale proposto presenta molti punti di contatto con modalità progettuali e di pianificazione ampiamente testate e sperimentate che possono concorrere al rinnovamento delle modalità di redazione, attuazione e gestione dei Piani urbanistici. Esempi ne sono le norme, le linee guida e gli abachi del Piano di Indirizzo Territoriale Paesistico (PIT) della Regione Toscana (Carta et alii, 2022; Fig. 9) e il ricco apparato di allegati al Piano Paesistico Regionale (PPR) del Piemonte (Gisotti, 2016), le immagini interpretative su cui è strutturato il Piano di Anversa (Secchi and Viganò, 2009) e l'identificazione per immagini di condizioni cui Progetto Urbano deve rispondere (Fernández Castro, 2007), come nel progetto per il Barrio 31 a Buenos Aires (Fig. 10) e gli schemi (Fig. 11) sviluppati collettivamente, insieme agli abitanti, nei processi di articolazione socio-spaziale nei progetti guidati da Jorge Mario Jáuregui (2013) a Rio de Janeiro.

Mentre nel caso toscano alla lettura dettagliata del rapporto tra costruito e sistema ambientale del territorio seguono le Linee Guida per la Qualità degli Insediamenti, gli allegati al Piano piemontese si spingono oltre, apportando indicazioni, anche molto precise, sulle modalità e possibilità di intervento. Se la relazione tra i momenti della lettura e le indicazioni progettuali elaborate, nel caso toscano, si sviluppano entro una logica coerente (i risultati sono desunti dall'analisi), nelle proposte piemontesi, invece, questa relazione è meno lineare, dimostrando il ruolo assegnato al progetto in quanto strumento di lettura e dispositivo normativo.

Il ricorso a tale idea di progetto sta alla base anche del Piano di Anversa, in cui la 'vaghezza' e potenza evocativa delle 'immagini' (Figg. 12, 13) costituiscono il frame entro cui proposte progettuali molto specifiche vengono avanzate (Viganò, 2010). Nella stessa linea si muovono gli esempi latinoamericani citati. Il caso argentino fa ricorso al progetto-prefigurazione per innescare le trasformazioni, agendo sull'elaborazione di condizioni 'permanenti' cui il progetto deve rispondere (accessibilità, referenzialità, abitabilità, interscambio, demarcazione; Fig. 14), aggiornando, anche attraverso il confronto con la comunità, le forme fisiche che tali categorie assumono nella condizione contemporanea. L'elaborazione teorico-metodologica costruita intorno alle esperienze brasiliane di Jáuregui (Fig. 15) parte dallo studio delle condizioni geografiche e morfologiche per valutare vocazioni e potenzialità del territorio, verificare il grado di trasformabilità dello spazio e, includendo la molteplicità di attori interessati, definire strategie adattive finalizzate al controllo quantitativo e qualitativo dello sviluppo urbano.

Le esperienze richiamate appartengono al milieu culturale in cui la proposta avanzata in questo saggio si inserisce, sia perché, fondate sull'analisi



Fig. 2 | Typological abacus: Building types recurrences, City of Porto (credit: M. Barbieri).

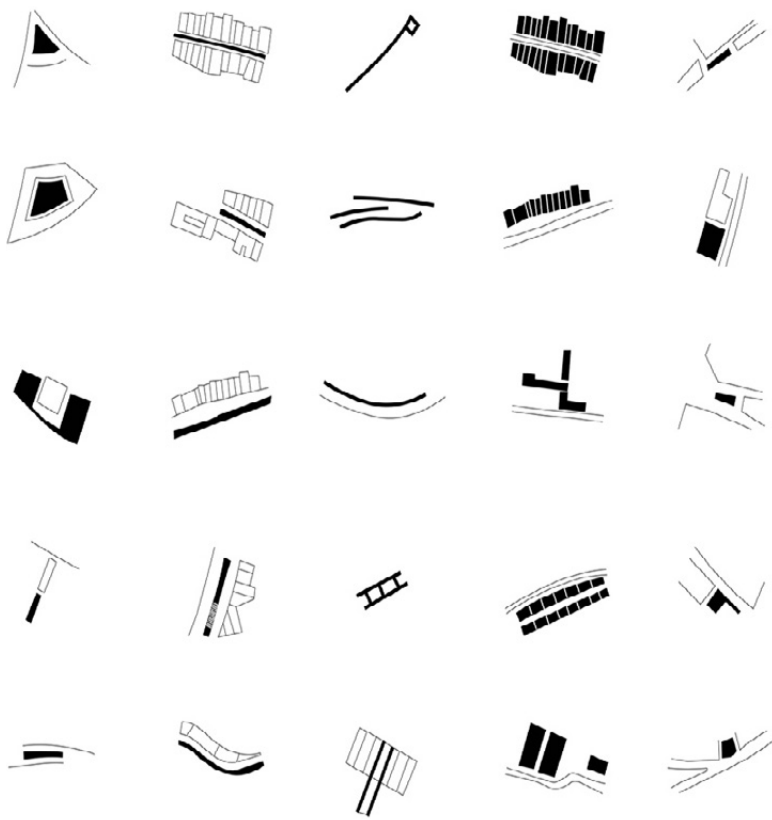


Fig. 3 | Typological abacus: Public space recurrences, City of Porto (credit: M. Barbieri).

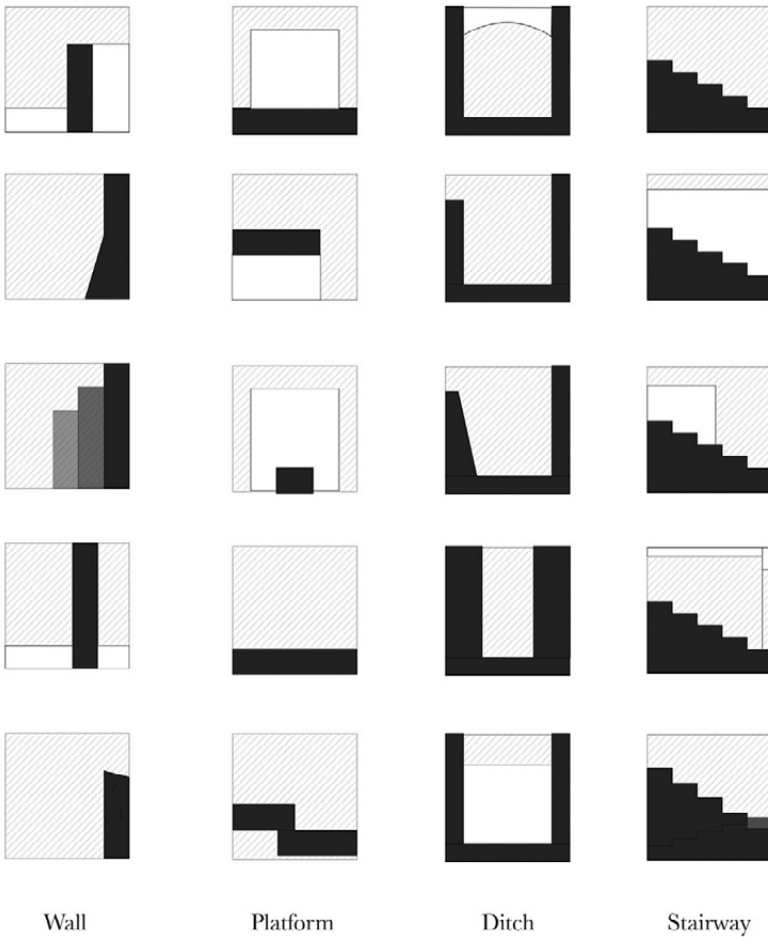


Fig. 4 | Topography and Tectonics: Abacus of type modification devices, City of Porto (credit: M. Barbieri).

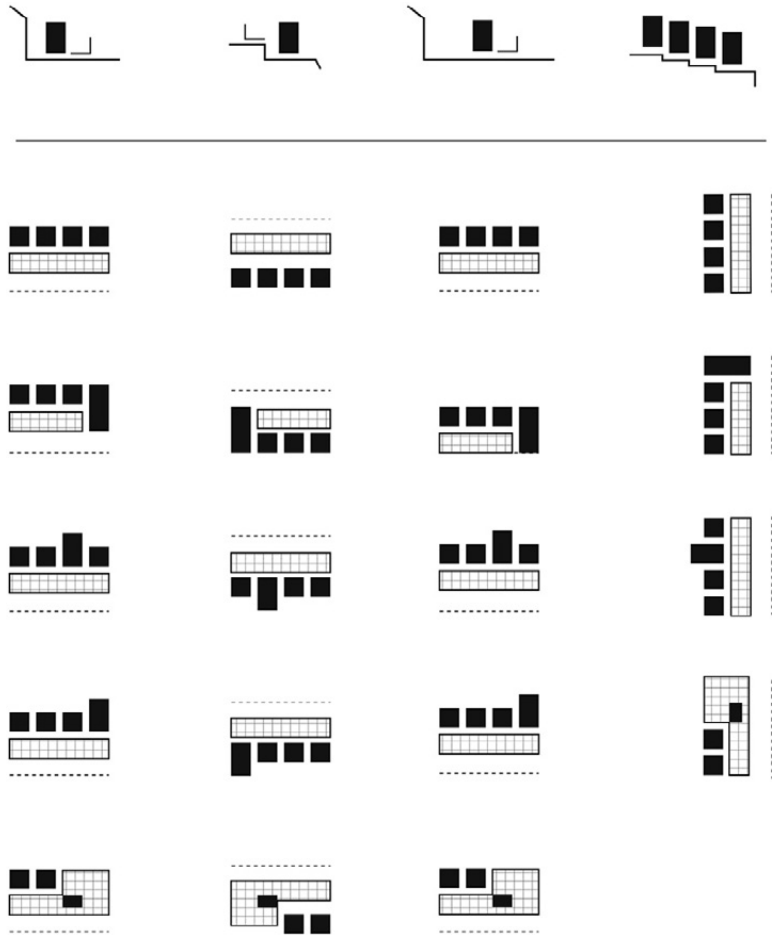


Fig. 5 | Typological alphabet: Recurring forms of aggregation, City of Porto (credit: M. Barbieri).



Fig. 6 | Behaviors, dynamics of development, generation and modification of the form of Popular Habitat in the Buenos Aires metropolitan area: 1) Concentration and condensation; 2) Embedding; 3) Completion and expansion; 4) Protecting and surrounding centralities (credit: M. Croci).

e sulla caratterizzazione delle forme dello spazio urbano, riconoscono al progetto un ruolo centrale per l'interpretazione della realtà sia in quanto dispositivo abilitante delle trasformazioni; tuttavia, pur dimostrando di rispondere alle premesse e divenendo strumenti efficaci per la descrizione, attuazione, indirizzo e attivazione delle trasformazioni, gli esempi citati presentano caratteristiche di eccezionalità e limiti sui quali è opportuno riflettere, essendo circoscrivibili a specifici ambiti (esempi latinoamericani) o basati su procedure di rile-

vamento prevalentemente deduttive e congetturali (Anversa, PPR Piemonte, PIT Toscana).

L'applicazione sistematica a contesti quali un intero territorio (comunale, metropolitano, regionale) del metodo proposto richiede di attivare e di fare ricorso a strumenti innovativi. È necessario capitalizzare gli sviluppi tecnologici a disposizione sia per la raccolta, gestione ed elaborazione dei dati, che per la loro comunicazione e rappresentazione, attraverso metodi dinamici di georeferenziazione, mappatura e organizzazione dei dati

che, mutuando esperienze condotte prevalentemente sui temi ambientali (Roest et alii, 2023; Bartesaghi-Koc, Osmond and Peters, 2019) ed economico-demografici, possano integrare e aggiornare gli elaborati a servizio del Piano.

Con l'applicazione del remote sensing (Lehner and Blaschke, 2019) la precisione e la esaustività delle operazioni di rilievo e monitoraggio delle dinamiche di variazione rende possibile costruire abachi estesi accurati. La gestione, elaborazione e messa in relazione di elementi invariati

attraverso processi di machine learning (Turk, 2023) e l'uso di modelli urbani Cellular Automata (Feng et alii, 2018), secondo i tre temi di indagine, può fornire una solida base per l'individuazione di regole attuative e di indirizzo. Inoltre la capacità di sovrapporre livelli di indagine e le possibilità di aggiornamento in tempo reale possono ridurre l'inerzia rispetto ai mutamenti e all'incertezza della condizione urbana. Questi metodi infatti ci permettono di sfuggire a un atavico problema degli approcci morfologici alla lettura e al progetto della città: la generalizzazione eccessiva, l'impossibilità di dialogare con casi specifici differenziati.

Ovviamente non si tratta di fare operazioni di rilievo e raccolta dei dati ma di sfruttare gli strumenti per l'ottenimento e la gestione provando a ipotizzare i mezzi per la sintesi, trasmissione e comunicazione degli esiti della lettura e interpretazione (ma anche delle prefigurazioni e delle ipotesi gestionali di verifica e valutazione). Le mappe, modelli e database GIS devono essere integrati da altri elementi che vanno dalla produzione di immagini e scenari evocativi ma pertinenti (Secchi and Viganò, 2009) all'elaborazione di diagrammi (Trisciuglio et alii, 2021; Jerez, 2011) o alle operazioni basate sul disegno come quelle sviluppate per la città americana da Mario Gandelsonas (1999).

Conclusioni | Incertezza e mutazione. Sembra che la 'nuova questione urbana' (Secchi, 2013) sia inafferrabile, inaffrontabile. L'incapacità e l'inerzia della Pianificazione mettono in discussione gli apparati teorici con cui l'urbanistica ha sempre lavorato. L'evidente indeterminazione dei fenomeni territoriali (Koolhaas, 1995) colloca la disciplina (soprattutto la pratica) di fronte al vuoto dell'angoscia epistemologica. Siamo in mezzo a una «[...] rivoluzione spaziale-culturale chiamata a ripensare nozioni consolidate per l'interpretazione e il progetto dello spazio rispetto a questioni di ordine, forma, organizzazione, struttura, geometria e/o linguaggio architettonico, tutte meno lineari, tassative o deterministiche perché più eterogenee, dinamiche e complesse» (Gausa, 2022, p. 15).

In questo quadro, tornare a lavorare sui concetti 'classici' di Tipologia, Topografia e Tettonica sembrerebbe contraddittorio ma farlo con uno sguardo rinnovato, focalizzato sulla transizione (delle forme, delle pratiche e delle ecologie), significa, da una parte, riportare l'urbanistica verso le questioni morfologiche e delle relazioni tra pratiche ed esiti materiali e, dall'altra, espandere la portata teorica degli studi sulla forma urbana entro una logica sistemica e multidisciplinare (Gausa, 2022; Trisciuglio et alii, 2021).

Riconoscere che nell'inscindibile relazione che intercorre tra le forme della città e la conformazione topografica, nel rapporto tra i tipi edilizi e i modi di abitare e nella dialettica tra tecnologie costruttive e forma sono contenuti gli esiti di un lungo e stratificato processo che traduce fisicamente le regole, i codici e le dinamiche delle società nel tempo può fornirci gli strumenti per proporre, incentivare e attivare progetti sufficientemente appropriati, evocativi e flessibili, di fronte alle incertezze del futuro, all'obsolescenza tecnica e funzionale e ai rapidi cambiamenti sociali, economici e ambientali. In questo senso l'approccio proposto non deve essere inteso quale contributo proveniente da un ambito disciplinare definito (quello dell'Architettura) ma, sulla base della componente

relazionale che caratterizza i tre termini, quale campo in cui confluiscono apporti specifici che devono essere messi a sistema, in sinergia e quale spazio integratore, luogo di quella 'architettura (o urbanistica) avanzata' auspicata da Manuel Gausa e Jordi Vivaldi (2021).

Sul piano concreto, per essere applicato, il metodo deve essere accompagnato da una rielaborazione teorica e operativa dei sistemi di rappresentazione, comunicazione ed elaborazione dei dati. Gli strumenti a disposizione devono essere ripensati, raccogliendo gli sviluppi e le esperienze di rinnovamento linguistico che indagano sulle potenzialità di diagrammi (Jerez, 2011), schemi e mappe interattivi, open-source e user-driven (Trisciuglio, 2021) e ridefinendo il ruolo tradizionalmente assegnato al disegno dagli studi morfologici.

In tal senso le mappe, gli abachi e i diagrammi, assumono una doppia valenza. Contengono indicazioni interpretative e descrittive delle condizioni rilevate e, contemporaneamente, elaborazioni e prefigurazioni progettuali capaci di stimolare processi 'evidence-based' (Kaw, Hyunji and Wabba, 2020) di scambio bidirezionale tra attori e promotori, tra materia e spazio, tra 'ambiente (attivo) e agenti (attivatori e attuatori)' – come direbbe Manuel Gausa (2022) – intercettando livelli crescenti di coinvolgimento, inclusione e ascolto tra tutti gli stakeholder, entro una logica di ampliamento della partecipazione (a diversi livelli) della cittadinanza in generale e come stimolo per l'allargamento delle componenti (tecniche, ecologiche, sociali, culturali) da integrare nel processo di progettazione in un'ottica di co-progettazione che, basata su una co-interpretazione, possa abilitare

3D view					
Roof plan					
Ground floor plan					
	Special buildings	Ruin	Building in line	Civil building with naves (market)	Agglomeration of buildings with Medieval morphogenesis

Elevation					
	2 floors above ground	3 floors above ground	6 floors above ground	2 floors above ground + garret	3 floors above ground + garret
Roof plan					
	flat roof	flat roof	flat roof	pitched roof	pitched roof
Ground floor plan					
	Row building Function: residential, commercial	Row building Function: residential, commercial	Row building Function: residential, commercial	Row building Function: residential, commercial	Row building Function: residential

Fig. 7 | Typological abacus of Alberti area, Rimini (credit: M. Crapolicchio).

Fig. 8 | Typological abacus: the elevation on the Roman road in the San Giovanni area, Rimini (credit: M. Crapolicchio).

una co-gestione dello spazio urbano 'bello, sostenibile ed inclusivo'.

The debate around the uncertainty that has characterised the contemporary condition (Stanganelli et alii, 2020) and around the possible ways in which Planning can and should act in governing the processes that affect our cities raises another crucial issue: the definition of tools and methodologies capable of protecting the aims and objectives that communities establish, according to the mechanisms provided by the legal-political order (Mazza, 2010). In the current landscape, the instability, the rapidity of mutations (Union Internationale des Architects, 1996) and the lack of predictability undermine the structure of traditional urban Planning based on the ability to make reliable

forecasts and projections (McLoughlin, 1969; Faludi, 1973; Chadwick, 1978; Salzano, 1995), and the rigid rule system of traditional prescriptive-type Planning proves inadequate in a debate that is becoming increasingly urgent, broad and extensive (Stanganelli and Bruni, 2017).

The overcoming (Salzano, 2008) of the conformative-prescriptive model of Plans (ex Italian L. 1150/42) led to slow but persistent experimentation with performative, strategic, structural, and operational forms of Planning (Galuzzi, 2023) that, thanks to the contribution of international debate and European policies (Janin Rivolin, 2008; Nadin et alii, 2018), are changing the relationship between Plans and the regulatory mechanisms of implementation. It is a matter of imagining flexible and adaptive systems for inclusion, equity, and sustainability (environmental and social) of the proposed transformations.

Drawing on Italian experiences and through the transfer of knowledge from different contexts – from Anglo-Saxon and Northern European planning to urban regeneration practices and informal settlement re-urbanization projects (Cortinovis and Geneletti, 2020; Carta, Gisotti and Lucchesi, 2022; Fernández Castro and Jáuregui, 2005; Fernández Castro, 2007) – this article investigates the possibility of structuring normative, prefigurative and implementation action by and for the project, working on the articulation of three competing concepts in the process of urban space formation: Typology, Topography and Tectonics. Topics that, while referring to processes and mechanisms of material production, intrinsically linked to the physical condition of our cities, recall and contain within them a multiplicity of social and collective practices and values: from memory to identity, from material culture to the description, definition, and redefinition of the relationship between men and women and their territories (Doberti, 2008; Berlanda, 2014; Frampton, 1995).

The operability and effectiveness of urban design require that the disciplines of design, from Composition (architectural and urban) to Technology, from Structures to Representation, from Geomatics to History, equip themselves with tools and methodologies capable of contributing to processes, directing, guiding, assisting, but also, and above all, involving and activating subjects and stakeholders in the construction of inclusive and innovative alternatives for the transformation of territories (Trisciuglio, 2021; Lepratti and Alfaro d'Alençon, 2018). It is necessary to redefine categories and reinvent devices for reading, interpreting, designing, prefiguring, and enabling governance, including the plurality of aspects that the urban condition has acquired in recent years (Secchi, 2013).

Concretely, working on Typology, Topography, and Tectonics, this paper proposes the construction of abacuses and catalogues that, collecting specific recurring patterns, attitudes, and solutions, can serve to guide design action (tangible and intangible) through the definition of systems, of rules and guidelines. It is not a matter of compiling manuals but of reflecting on how the city is transformed, highlighting the internal dynamics of processes, working on the identification of rules and models (Choay, 1996) of constructing and modifying the form of the city (Trisciuglio et alii, 2021) and recovering the dual significance of Giulio Carlo Argan's concept of the module as a synthesis and cultural expression and, at the same time, as a tool for qualitative and quantitative measuring, evaluating and monitoring.

The new digital surveying technologies, the possibility of managing massive amounts of georeferenced data, and the introduction of AI offer, in this sense, exceptional support and open truly promising operational scenarios (Candito et alii, 2019; Doria, 2022; D'Ambrosio et alii, 2022; Ma-

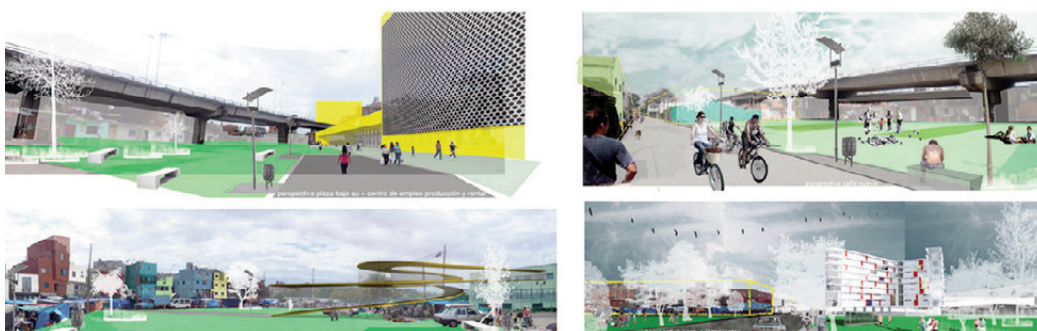
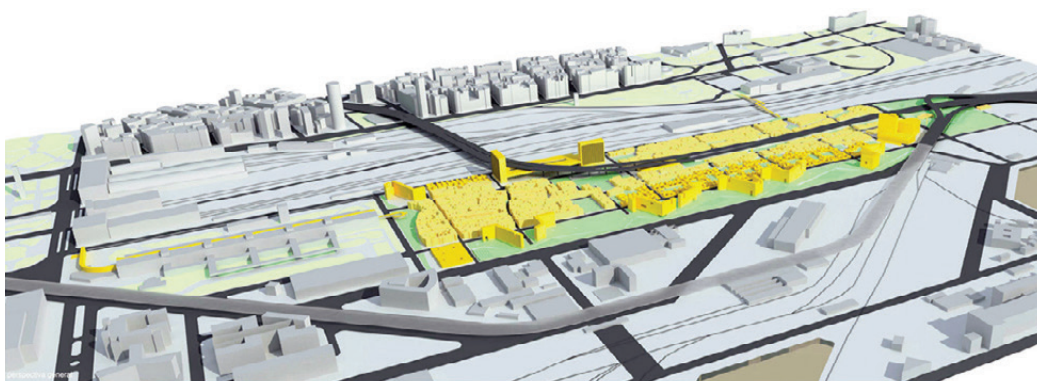
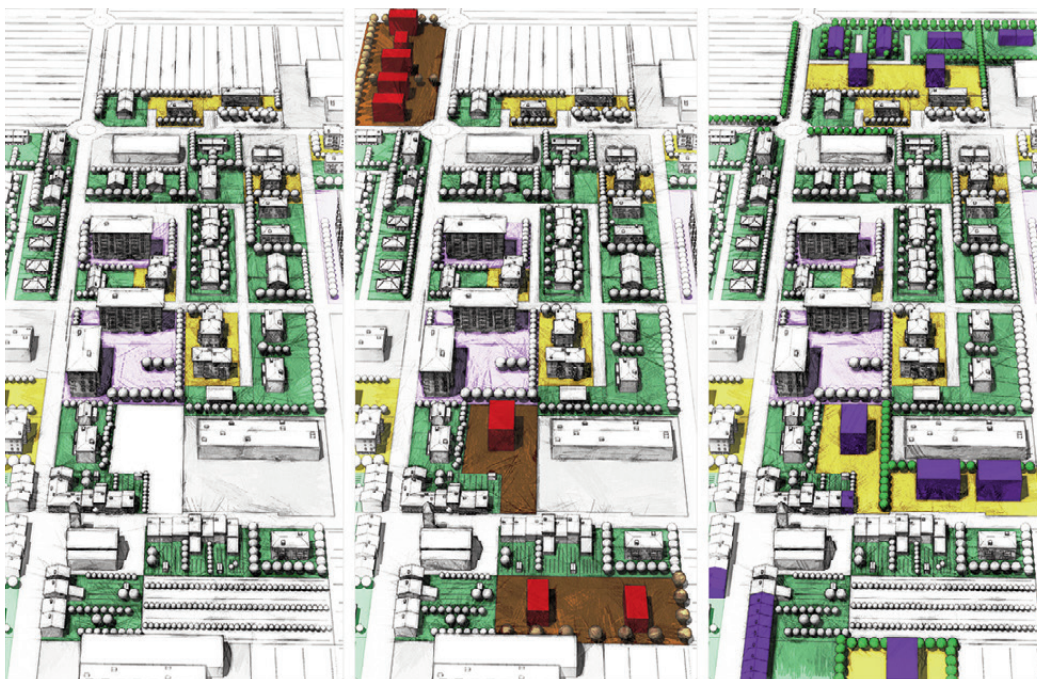


Fig. 9 | Guidelines for landscape redevelopment of urbanised fabric in the contemporary city, mixed-types fabric TR.6: current status, worst-case scenario, consistent hypothesis (credit: PIT Regione Toscana).

Fig. 10 | Buenos Aires, Barrio 31. Re-urbanization project: design prefigurations (credit: Instituto de la Espacialidad Humana, Universidad de Buenos Aires).

gliocco and Canepa, 2022) for understanding, prefiguring, and effectively governing the city in the process of transformation and transition for the durable and inclusive achievement of the Sustainable Development Goals (UN General Assembly, 2015).

Methodological premise | The introduction of margins of flexibility within a structural-strategic and operational vision of the plan must be supported by the project as a device for reading, interpreting, and enabling transformation frames. Starting from the basic concepts (typology, topography, tectonics), we propose the construction of a method to deepen the knowledge of cities, recording processes of transition (Triscioglio et alii, 2021), highlighting – through the production of operational models – the emergence of forms and spaces that the community validates, exercises, and recognises.

Indeed, in the face of what Secchi (2013) calls the ‘urban question’, the search for methodologies that can contribute to the inclusive implementation of transformations is one of the most sensitive issues in the process of urban planning renewal. In this sense, our proposal focuses on the centrality of the city’s physical space and the mechanisms that generate it, identifying in the categories of reading and design rules and prefigurations, ‘modules’, as valuable tools to overcome a static and linear view of the built environment, including the practices and actors that influence and shape them.

In order to do so, this essay proposes contamination between lines of research that, in the disciplinary developments of architecture and urbanism, rarely engage in fruitful dialogue. In fact, the two disciplines have long consolidated discordant methodological approaches to understanding the city and the territory and have demarcated exclusive areas for the project practice, qualifying cultural domains and interests that are often incompatible with each other (Ieva, 2017). In this framework, it is essential to make explicit and delimit the meaning that Typology, Topography, and Tectonics assume in this paper, framing them in the cultural context in which they fit or from which they derive.

Definitions | Although, from the very Title, the triad of concepts immediately refers back to studies on urban morphology, to the Italian Muratorian tradition and also the developments in the Anglo-German field elaborated by Conzen (2012), the theoretical framework that is proposed through the redefinition and re-proposition of the concepts is the capitalisation of contributions (only apparently antagonistic) coming from the intense Italian debate that stemmed from the theoretical and design practice of Vittorio Gregotti (1966) and Bernardo Secchi (1997) but also from more autonomous and ‘peripheral’ developments elaborated in the Latin American sphere, both as construction of theoretical apparatuses and as methodological proposals (Doberti, 2008; Fernández Castro, 2011) based on concrete applied experiences (Jáuregui, 2013; Fernández Castro and Jáuregui, 2005). It is shown how these contributions have in common an interest in defining operational tools that arise from the recognition, in the recurrences and repetitions of elements, of devices

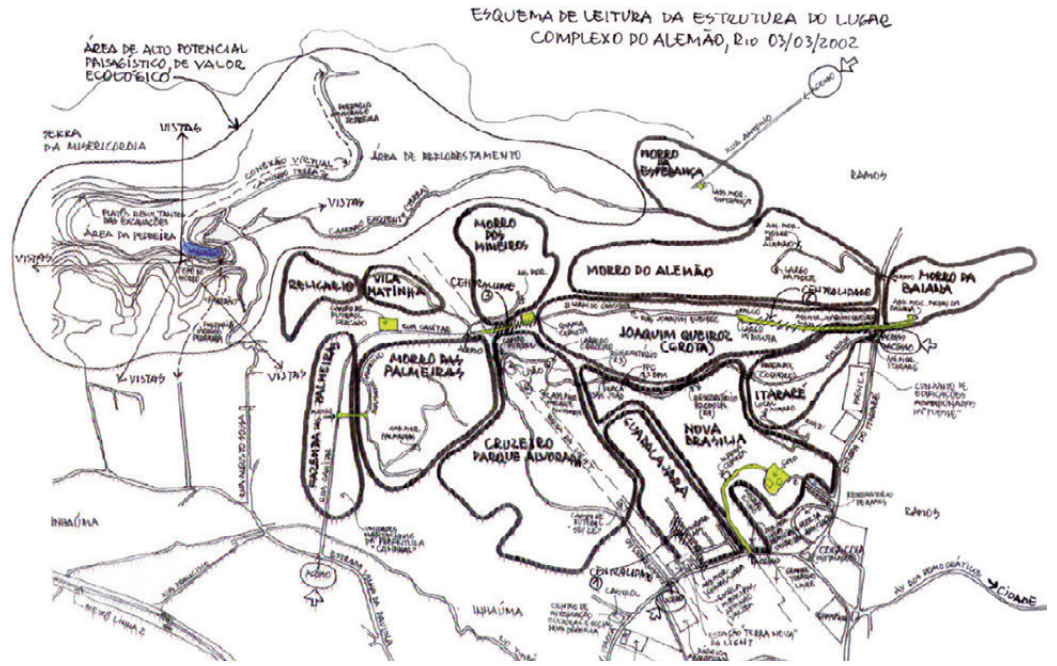


Fig. 11 | Place structure reading scheme: Complexo do Alemão (2007) in Rio de Janeiro (source: Jáuregui, 2013).

and attitudes that conform space, from which to proceed to the prefiguration of proposals that include and articulate tradition, limits, peculiarities, desires and aspirations of the societies and places of the practice.

Typology | In the proposed view, Typology is understood broadly and expansively, as it includes the Muratorian idea of type as a structural form. For Muratori, in fact, type is not an abstract concept (Moneo, 1978) but rather an element that enables the understanding of the dynamics of the development of the urban form and its transformation, showing how in the building type the set of technical, economic and social constraints materialises at different historical moments. The concept contains the dialectical relation with the history that establishes the type that unites the developments of the type-morphological approach of Caniggia and Maffei (1991), Maretto (1993), and then Aymonino (1970) and Rossi (1966) with the operation carried out by Bernardo Secchi (2015) for whom, in the characterisation of open spaces and the built environment, in the ways through which they are combined, in the identification of specific sequences, alignments, and structural grids, and even in the building materials used or in the recognition of recurring languages, a system of ‘rules’ is found that constitute, in some way, an evolution of the concept of type and the elements with which to build the project of modification of the city (Moschini, 2014).

A further contribution to the definition of the conceptual framework is represented by the work of Roberto Doberti. His research, anchored in the theoretical production developed in the European context just mentioned, enriches (through a look at the specificity of the Latin American local realm) the interpretive framework for understanding reality through constructing two levels of reading and classification of the urban condition. By identifying ‘configurational typologies’ and ‘semantic typologies’ as competing elements that can be traced in how urban forms and practices have de-

veloped, Doberti proposes an articulation of recurring morphological characters with the meanings these forms take on in the structure and organisation of the city space (Doberti et alii, 1998; Doberti, 2008, 2011; Fig. 1).

Topography | The ground conditions and influences the action and mechanisms by which the city is generated. The Type transforms, mutates, and changes precisely in its relationship with the topography. In this sense, we propose an extension of the meaning it takes on in Italian and French morpho-typological studies (Caniggia, 1976; Panerai, Depaule and Demorgon, 1999) based on a mechanistic and deterministic topographical approach in which it is essentially the orographic structure that defines the paths of urbanisation, in an abstract and universal temporal process: a territorialist view extends the gaze to the relationships of a broader set of components and it is referred to a specific geographic region, understood as an area in which a solid settlement culture has settled (Poli, 2017). It is a question of restoring to the term an active role for the modification of the territory, for its evaluation, as a tool for recognising the historical and geographical context and as a component of an anthropogeographical landscape capable of containing and suggesting its own modifications (Gregotti, 2011): a role for topography that underlies the ideas of ‘principles of implantation’ and ‘project of the soil’, diffusely tested by Secchi (Fini, 2017).

Tectonics | In the concept of Tectonics, the two previous notions find a synthesis. The term refers to the part of geology that deals with the deformation of the Earth’s crust, of the soil, and the mechanisms that change the morphology of the land. However, Tectonics is also the set of technical systems that make the construction of architecture possible, determining its form and giving rise to it. Tectonics is also ‘the art of connection’ of not only architectural elements, an assembly technique, rule, and mechanism. At the urban level,

the analysis of tectonic characters can be understood as the comprehension of the practical laws underlying its construction in the vision of the continuity of tradition. By construction, in this sense, we mean structural and technological laws and culture, thus the founding principles of the city's own morphology. From this perspective, it is significant that in his very study of Tectonics, Kenneth Frampton (1995) addresses the issue of the grounding of design activity by emphasising the relationship between Topos, Typos and Tectonics, settlement typology, building typology, and structural typology, thus the relationship between technical and symbolic aspects, between empirical conditions of production and between reasons (functional, economic, social) and history (Gregotti, 1999).

Methodological Proposal | Based on the concepts developed, we propose the construction of an instrumental method to support planning action, working on the three competing levels for the reading, design, and governance of transformations. It involves defining, classifying and systematising the outcomes of an investigation to be conducted on the 'physical city' (Secchi, 2000), starting from the belief that a place can be under-

stood with the tools of the project and its techniques (Viganò, 2010). In particular, through the typological investigation, it is possible to understand, catalogue, and identify recurrences to describe dynamics and develop design hypotheses (Fig. 2). From the topographical reading should emerge in-depth environmental knowledge and arise – through relating the dynamics of transition and variation of typologies – an abacus of solutions and devices for modification on the territorial and landscape-ecological level and on the spatial level, both of the built and public space (Fig. 3, 4). The tectonic research relates to recurring and structuring mechanisms of urban space (Fig. 5), focusing on the action of agents that influence changes on the cultural, social, and economic levels and measuring the impact on the physical conformation of the city (Fig. 6).

Specifically, it is expected to compile extensive and synthetic abacuses containing the classified set of findings inferred from careful surveys and the organised summary of recurring elements found. Such compendia, highlighting the variety of urban facts according to the three themes – precisely because they focus on the mechanisms of production – are configured as possible codes (sets of rules) and as evocative addresses and

preconfigurations that are both specific and singular but also generic and open-ended (Fini and Pezzoni, 2010) to enable effective and direct implementation of the operational components of the Plans and to activate understanding and stimulate structural and strategic formulations.

The ensemble resulting from these analyses will allow the construction of a possible dynamic, graphic, and conceptual atlas to be integrated into the Plan documents (Fig. 7, 8). Its availability will be able to provide support both to governance, for the evaluation of the coherence of interventions concerning the objectives of the Plan, and to stakeholders and designers, in that through the organised display of recurrences, the physical margins of modification of the urban fabric, territory, and landscape will become clear from a morphological point of view; it will also constitute a valid device for empowerment and engagement of communities in the transformation of the habitat.

The proposed interpretive-design method has many points of contact with widely tested and proven design and planning methods that can contribute to the renewal of how urban plans are drafted, implemented and managed. Examples are the regulations, guidelines, and abacuses of the Region of Tuscany's Landscape Plan – PIT (Carta et alii, 2022; Fig. 9) and the rich apparatus of annexes to the Regional Landscape Plan (PPR) of Piedmont (Gisotti, 2016), the interpretive images on which the Antwerp Structure Plan is organised (Secchi and Viganò, 2009) and the identification by images of conditions to which the Urban Project must respond (Fernández Castro, 2007), as in the project for Barrio 31 in Buenos Aires (Fig. 10) and the schemes (Fig. 11) developed collectively, together with the inhabitants, in the socio-spatial articulation processes in the projects led by Jorge Mario Jáuregui (2013) in Rio de Janeiro.

While in the Tuscan case, the detailed reading of the relationship between the built environment and the territory's environmental system is followed by Guidelines for the Quality of Settlements, the annexes to the Piedmonts' Plan go further, delivering indications, even very precise ones, on the modalities and possibilities for action. If the relationship between the moments of reading and the design indications, in the Tuscan case, is developed within a coherent logic (the results are inferred from the analysis), in the Piedmonts' proposals, on the other hand, this relationship is less linear, demonstrating the role assigned to the project as a reading tool and regulatory device.

The use of such a design idea also underlies the Antwerp Plan, in which the 'vagueness' and evocative power of 'images' (Fig. 12, 13) constitute the frame (Viganò, 2010) within which very specific design proposals are advanced. In the same vein are the Latin American examples cited above. The Argentine case makes use of the project prefiguration to trigger transformations, acting on the elaboration of 'permanent' conditions to which the project must respond – i.e., accessibility, referentiality, habitability, interchange, demarcation (Fig. 14) – actualising, also through confrontation with the community, the physical forms that these categories assume in the contemporary condition. The theoretical-methodological elaboration built around Jáuregui's Brazilian experiences (Fig. 15) starts from the study of geographic and morphological conditions in order to as-

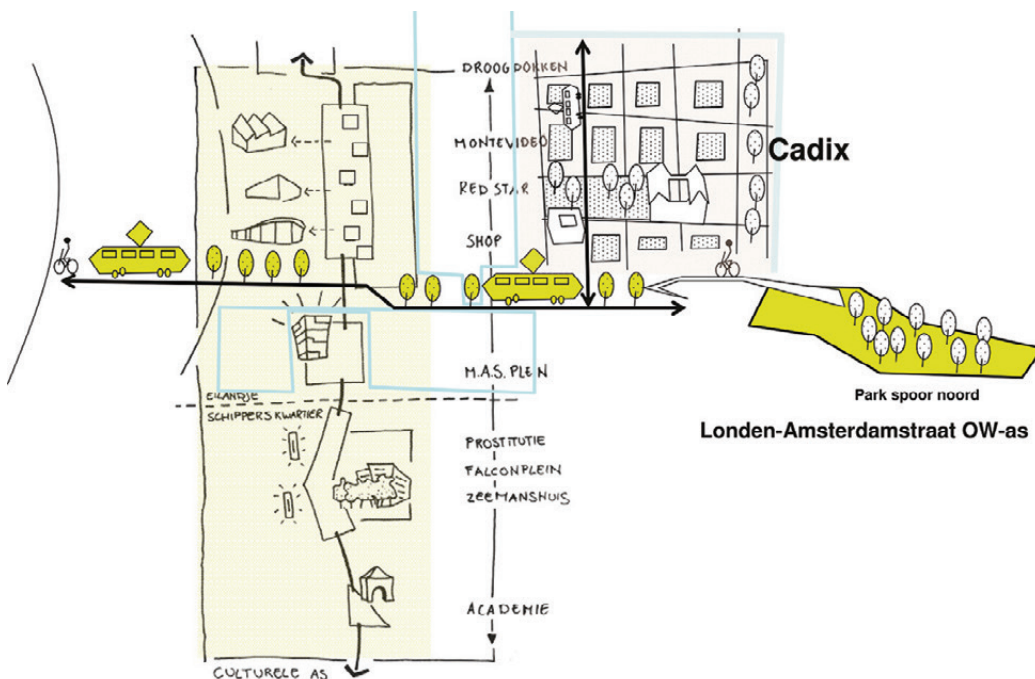
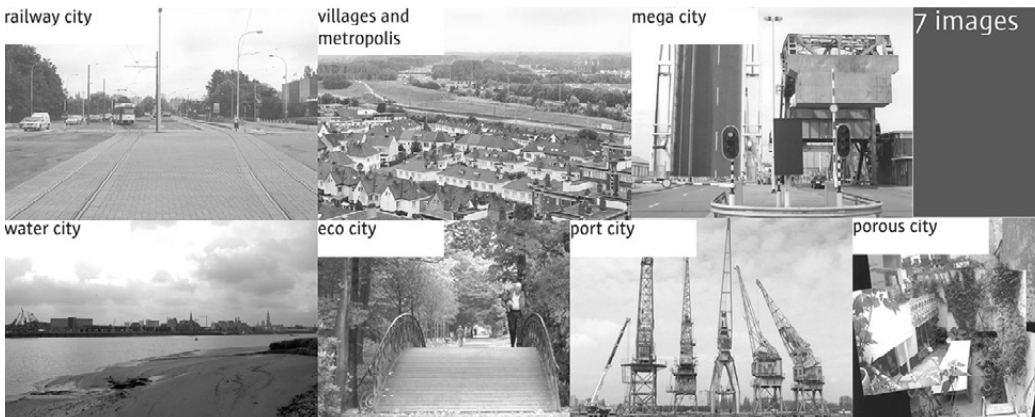


Fig. 12 | Antwerp Structure Plan: the seven images of the Urban Plan (source: Secchi and Viganò, 2009).

Fig. 13 | Antwerp Structure Plan: Cultural north-south axis (source: Secchi and Viganò, 2009).

	A. FLUJO	B. REFERENCIA	C. HABITACION	D. INTERCAMBIO Y DESLINDE
> MACRO	CONTINUIDAD AUTOPISTA FERROCARRIL PORTUARIO	MEMORIAL MUGICA	VIVIENDAS NUEVAS (ALTA DENSIDAD)	NODO MOVIMIENTO AVENIDA DE BORDE E INMIGRANTES
> MEZZO	CALLES PRINCIPALES TRANSPORTE PÚBLICO	PLAZA DE LA FERIA PARQUE CENTRAL + CEPR	VIVIENDAS NUEVAS (MEDIA DENSIDAD)	PASARELA TERMINAL Y THAYS PARQUE INMIGRANTES
> MICRO	CALLES SECUNDARIAS PASAJES Y CITÉS	PLAZAS INSTITUCIONES BARRIALES	VIVIENDAS MEJORADAS INFRAESTRUCTURA PRIVADA	CRUCES BARRIALES BORDES INTERNOS

Fig. 14 | Buenos Aires, Barrio 31. Re-urbanization project: Accessibility, referentiality, habitability, interchange, and demarcation (credit: Instituto de la Espacialidad Humana, Universidad de Buenos Aires).

sess vocations and potentialities of the territory, verify the degree of spatial transformability and, by including the multiplicity of stakeholders, define adaptive strategies aimed at quantitative and qualitative control of urban development.

The experiences recalled belong, in terms of design, to the cultural milieu in which the proposal put forward in this paper fits in as starting from the analysis and characterisation of the forms of urban space they assign to the project a crucial role for the interpretation of reality and as a device that makes transformations possible. These cases have proven to respond to the premises, becoming effective tools for describing, implementing, directing, and activating transformations. However, they have characteristics of exceptionality and limitations that should be reflected upon. They have been conducted in circumscribed areas (Latin American examples) or are based on mainly deductive and conjectural surveying procedures (Antwerp, PPR Piedmont, PIT Tuscany).

Systematic application of the proposed method to contexts such as an entire territory (municipal, metropolitan, regional) requires activating and using innovative tools. There is a need to capitalise on the technological developments available both for data collection, management, and processing and for their communication and representation through dynamic methods of georeferencing, mapping, and data organisation that, borrowing from experiences conducted mainly on environmental (Roest et alii, 2023; Bartesaghi-Koc, Osmond and Peters, 2019) and economic-demographic issues, can complement and update the documents serving the Plan.

By applying remote sensing (Lehner and Blaschke, 2019), the accuracy and comprehensiveness of surveying and monitoring of variation dynamics make it possible to construct accurate extended abacuses. The management, processing, and relating of invariant elements through machine learning processes (Turk, 2023) and the use of urban Cellular Automata models (Feng et alii, 2018), according to the three themes of investigation, can provide a solid basis for the identification of implementation and steering rules. In addition, the ability to overlay levels of investigation and the possibilities for real-time updating can reduce inertia with regard to changes and uncertainty in the urban condition. These methods, in fact, allow us to escape an atavistic problem of morphological approaches to city reading and design: the over-generalisation and the impossibility of dialoguing with specific differentiated cases.

Obviously, it is not a matter of doing surveying and data collection operations but of exploiting the tools for obtaining and managing them by trying to hypothesise the means for the synthesis, transmission, and communication of the outcomes of reading and interpretation, but also of reconfigurations and management hypotheses for verification and evaluation. GIS maps, models, and databases need to be complemented by other elements ranging from the production of evocative but relevant images and scenarios (Secchi and Viganò, 2009) to diagramming (Trisciuglio et alii, 2021; Jerez, 2011) or drawing-based operations such as those developed for the American city by Mario Gandelsonas (1999).

Conclusions | Uncertainty and mutation. The ‘new urban question’ (Secchi, 2013) seems elusive and ungraspable. The inability and inertia of Planning challenges the theoretical apparatuses with which urbanism has always worked. The obvious indeterminacy of spatial phenomena (Koolhaas, 1995) places the discipline (especially practice) in the void of epistemological angst. We are in the midst of a «[...] revolution of our time, one that calls for a rethinking of established notions for the interpretation (and design) of space with respect to questions of order, form, arrangement, structure, geometry, representation and/or architectural language, all of which are less linear, imperative or deterministic because they are more heterogeneous, dynamic and complex» (Gausa, 2022, p. 19).

In this framework, going back to work on the ‘classical’ concepts of Typology, Topography, and Tectonics would seem contradictory, but doing so with a renewed gaze focused on transition (of forms, practices, and ecologies) means, on the one hand, bringing urbanism back towards morphological questions and the relations between practices and material outcomes and, on the other hand, expanding the theoretical scope of urban form studies within a systemic and multidisciplinary logic (Gausa, 2022; Trisciuglio et alii, 2021).

Recognising that in the inseparable relationship between city forms and topographical conformation, in the relationship between building types and modes of living, and inside the dialectic between building technologies and form are contained the consequences of a long and layered process that physically translates the rules, codes and dynamics of societies over time can provide

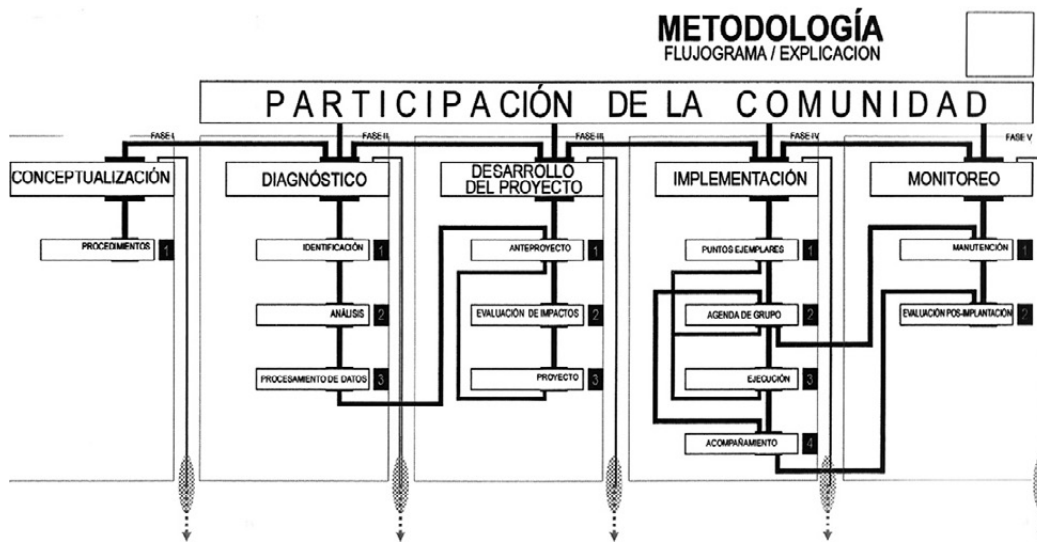


Fig. 15 | 'La escucha de las demandas y la participación de la comunidad': operational methodology Jáuregui (source: Jáuregui, 2013).

us with the tools to propose, stimulate and activate sufficiently appropriate, evocative and flexible projects in the face of future uncertainties, technical and functional obsolescence and rapid social, economic and environmental changes. In this sense, the proposed approach should not be understood as a contribution from a defined disciplinary field (that of architecture) but, on the basis of the relational component that characterises the three terms, as a field in which specific contributions converge, in cooperation, as an integrating space, the locus of that 'advanced architecture (or urbanism)' advocated by Manuel Gausa and Jordi Valdi (2021).

On a concrete level, the method must be accompanied by a theoretical and operational reworking of the systems of representation, communication and data processing to be applied.

Acknowledgements

This study was carried out within the Italian Ministerial Decree no. 1062/2021 and received funding from the FSE REACT-EU – PON 'Ricerca e Innovazione 2014-2020'; this manuscript reflects only the views and opinions of the Author, neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them.

References

- Aymonino, C., Brusatin, M., Fabbri, G., Lena, M., Lovero, P., Lucianetti, S. and Rossi, A. (1970), *La città di Padova – Saggio di analisi urbana*, Officina Edizioni, Roma.
- Bartesaghi-Koc, C., Osmond, P. and Peters, A. (2019), "Mapping and classifying green infrastructure typologies for climate-related studies based on remote sensing data", in *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 37, pp. 154-167. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ufug.2018.11.008 [Accessed 12 October 2023].
- Berlanda, T. (2014), *Architectural Topographies – A Graphic Lexicon of How Buildings Touch the Ground*, Routledge, New York. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315813196 [Accessed 12 October 2023].
- Cándito, C., Gausa, M., Pitanti, M. and Sola, G. (2019), "Dati Open Source e Progetto Strategico per la Città Resiliente | Open Source Data and Strategic Project for Resilient City", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 117-126. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5132019 [Accessed 12 October 2023].
- Caniggia, G. (1976), *Strutture dello spazio antropico – Studi e note*, Uniedit, Firenze.
- Caniggia, G. and Maffei, G. L. (1991), *Lettura dell'edilizia di base*, Marsilio, Venezia.
- Carta, M., Gisotti, M. R. and Lucchesi, F. (2022), "Settlements and Urban Morphological Quality in Landscape Planning – Analytical Models and Regulating Tools in the Landscape Plan of Regione Toscana", in *Sustainability*, vol. 14, issue 3, article 1851, pp. 1-31. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su14031851 [Accessed 19 October 2023].
- Chadwick, G. (1978), *A system view of planning – Towards a Theory of the Urban and Regional Planning Process*, Pergamon Press, Oxford. [Online] Available at: sciencedirect.com/book/9780080206257/a-systems-view-of-planning#book-description [Accessed 12 October 2023].
- Choay, F. (1996), *La Règle et le Modèle – Sur la théorie de l'architecture et de l'urbanisme*, Seuil, Paris.
- Conzen, M. R. G. (2012), *L'analisi della forma urbana – Alnwick, Northumberland*, FrancoAngeli, Milano.
- Cortinovis, C. and Geneletti, D. (2020), "A performance-based planning approach integrating supply and demand of urban ecosystem services", in *Landscape and Urban Planning*, vol. 201, article 103842, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103842 [Accessed 12 October 2023].
- D'Ambrosio, V., Di Martino, F. and Rigillo, M. (2022), "Tecnologie geocomputazionali digitali per il metaprogetto di infrastrutture verdi urbane | Digital geocomputational technologies for the metaproject of urban green infrastructures", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 11, pp. 162-171. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11142022 [Accessed 19 October 2023].
- Doberti, R. (2011), *Habitar, Nobuko*, Buenos Aires.
- Doberti, R. (2008), *Espacialidades*, Ediciones Infinito, Buenos Aires.
- Doberti, R., Giordano, L., Petrilli, M., Fernández Castro, J., Misuraca, A. and D'Angeli, L. (1998), *La incógnita del Gran Buenos Aires – Aproximaciones a una teoría del proyecto desde la lógica del habitar*, Laboratorio de Morfología FADU-UBA, Buenos Aires.
- Doria, E. (2022), "L'automazione del censimento tecnologico – Il centro storico di Betlemme | Automation of urban technological census – The historical centre of Bethlehem", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 178-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12162022 [Accessed 19 October 2023].
- Faludi, A. (1973), *Planning Theory*, Pergamon Press, Oxford.
- Feng, Y., Cai, Z., Tong, X., Wang, J., Gao, C., Chen, S. and Lei, Z. (2018), "Urban Growth Modeling and Future Scenario Projection Using Cellular Automata (CA) Models and the R Package Optimx", in *ISPRS | International Jour-*

and listening among all stakeholders, within a logic of broadening the participation (at different levels) of citizenship in general and as a stimulus for broadening the components (technical, ecological, social, cultural) to be integrated into the design process in a co-design perspective that, based on a co-interpretation, can enable a co-management of 'beautiful, sustainable and inclusive' urban space.

nal of Geo-Information, vol. 7, issue 10, article 387, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/ijgi7100387 [Accessed 12 October 2023].

Fernández Castro, J. (2011), “Las formas de lo informal – Elementos de lectura, proyecto y gestión inclusiva desde la investigación proyectual”, in *IX Jornadas de Sociología, – Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires*. [Online] Available at: academica.org/000-034/863 [Accessed 19 October 2023]

Fernández Castro, J. (2007), “Metro > Intra < Meta – Categorías para leer y proyectar la Ciudad Latinoamericana”, in *6as. Jornadas de Investigación en Arquitectura*, FArc UdelaR, Montevideo, pp. 245-251. [Online] Available at: fadu.edu.uy/publicaciones/coleccion-general-libros/6as-jornadas-de-investigacion-en-arquitectura/ [Accessed 12 October 2023].

Fernández Castro, J. and Jáuregui, J. M. (2005), “Articulaciones urbanas – Un proyecto para el Barrio 31 de Retiro”, in Borthagaray, J. M., Igarzábal de Nistal, M. A. and Weinstein-Krasuk, O. (eds), *Hacia la gestión de un Hábitat Sostenible*, Nobuko, Buenos Aires, pp. 431-442.

Fini, G. (2017), “Il piano all'estero di Secchi-Viganò – Continuità, temi e dispositivi di progetto”, in Renzoni, C. and Tori, M. C. (eds), *Bernardo Secchi – Libri e Piani*, Officina edizioni, Roma, pp. 211-221.

Fini, G. and Pezzoni, N. (2010), “Il Piano Strutturale di Anversa – Un nuovo dispositivo di convivenza per la città contemporanea – Intervista a Bernardo Secchi e Paola Viganò”, in *Planum | The European Journal of Planning*, December 2010, pp. 1-21. [Online] Available at: researchgate.net/publication/283354856_Il_Piano_Strutturale_di_Anversa_un_nuovo_dispositivo_di_convivenza_per_la_citta_contemporanea_Intervista_a_Bernardo_Secchi_e_Paola_Vigano [Accessed 12 October 2023].

Frampton, K. (1995), *Studies in Tectonic Culture – The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*, MIT Press, Cambridge (MA).

Galuzzi, P. (2023), “Struttura/Strutturale”, in *Urbanistica Informazioni*, 19/02/2023. [Online] Available at: urbanisticainformazioni.it/Struttura-Strutturale.html [Accessed 12 October 2023].

Gandelsonas, M. (1999), *X-Urbanism – Architecture and the American City*, Princeton Architectural Press, New York.

Gausa, M. (2022), “Topologie verdi e paesaggi oltre il paesaggio – 30 anni di ricerche avanzate sulla ibridizzazione del verde | Green topologies and landscapes beyond the land – A 30-years research on green hybridization”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 11, pp. 14-25. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1112022 [Accessed 19 October 2023].

Gausa, M. and Vivaldi, J. (2021), *The Threefold Logic of Advanced Architecture – Conformative, Distributive and Expansive Protocols for an Informational Practice 1990-2020*, Actar Publishers, New York.

Gisotti, M. R. (2016), “Dal vincolo al progetto – Il quadro della pianificazione paesaggistica in Italia e una proposta per un modello operativo”, in Magnaghi, A. (ed.), *La pianificazione paesaggistica in Italia – Stato dell'arte e innovazioni*, Firenze University Press, Firenze, pp. 1-36. [Online] Available at: doi.org/10.36253/978-88-6453-371-1 [Accessed 19 October 2023]

Gregotti, V. (2011), *Architettura e Postmetropoli*, Einaudi, Torino.

Gregotti, V. (1999), “Introduzione”, in Frampton, K., *Tettonica e architettura – Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, Skira, Milano.

Gregotti, V. (1966), *Il territorio dell'Architettura*, Feltrinelli, Milano.

Ieva, M. (2017), “Il binomio dialettico-critico Urbanistica / Architettura nell'infuturarsi della città contemporanea”, in Carlotti, P., Camiz, A. and Díez Medina, C. (eds), *Urban Morphology and Design – Joint research perspectives and methodological comparison*, U+D | Urbanform and Design, Roma, pp. 138-148.

Janin Rivolin, U. (2008), “Conforming and Performing Planning Systems in Europe – An Unbearable Cohabita-

tion”, in *Planning Practice & Research*, vol. 23, issue 2, pp. 167-186. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1080/02697450802327081 [Accessed 12 October 2023].

Jáuregui, J. M. (2013), *Estrategias de articulación urbana*, Nobuko, Buenos Aires.

Jerez, F. (2011), “El dibujo de la indeterminación – Programa, acontecimiento y tiempo en Cedric Price y Rem Koolhaas | Drawing of indeterminacy – Program, event and time on Cedric Price and Rem Koolhaas”, in *EGA | Expresión Gráfica Arquitectónica*, vol. 16, issue 18, pp. 242-251. [Online] Available at: doi.org/10.4995/ega.2011.1109 [Accessed 12 October 2023].

Kaw, J. K., Hyunji, L. and Wabba, S. (eds) (2020), *The Hidden Wealth of Cities – Creating, Financing, and Managing Public Spaces*, World Bank, Washington (DC). [Online] Available at: doi.org/10.1596/978-1-4648-1449-5 [Accessed 19 October 2023].

Koolhaas, R. (1995), *S,M,L,XL*, The Monacelli Press, New York.

Lehner, A. and Blaschke, T. (2019), “A Generic Classification Scheme for Urban Structure Types”, in *Remote Sensing*, vol. 11, issue 2, article 173, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/rs11020173 [Accessed 12 October 2023].

Lepratti, C. and Alfaro d'Alençon, P. (eds) (2018), *Does effective planning really exist?*, Syntagma Verlag, Freiburg.

Magliocco, A. and Canepa, M. (2022), “Cruscotti a servizio della governance – Monitoraggio di indicatori di prestazione e indicatori aggregati | Governance dashboards – Monitoring of key performance and aggregate indicators”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 36-45. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1232022 [Accessed 12 October 2023].

Maretto, P. (1993), *Realtà naturale e realtà costruita*, Alinea, Firenze.

Mazza, L. (2010), “Limiti e capacità della pianificazione dello spazio”, in *Territorio*, vol. 52, pp. 7-24. [Online] Available at: doi.org/10.3280/TR2010-052001 [Accessed 12 October 2023].

McLoughlin, J. B. (1969), *Urban and regional planning – A systems approach*, Faber&Faber, London.

Moneo, R. (1978), “On Typology”, in *Oppositions*, vol. 13, Summer, pp. 22-45. [Online] Available at: usmodernist.org/OPP/OPP-1978-13.pdf [Accessed 19 October 2023].

Moschini, F. (2014), “Modificazioni nella città del XX secolo – Lezioni di piano per la metropoli contemporanea”, in *Anfione e Zeto*, vol. 25, pp. 121-31. [Online] Available at: fimaam.it/GALLERY/1/07/9/10798/1400575118.pdf [Accessed 12 October 2023].

Nadin, V., Fernandez Maldonado, A. M., Zonneveld, W., Stead, D., Dabrowski, M., Piskorek, K., Sarkar, A., Schmitt, P., Smas, L., Cotella, G., Janin Rivolin, U., Solly, A., Berisha, E., Pede, E., Seardo, B. M., Komornicki, T., Goch, K., Bednarek-Szczepańska, M., Degórska, B., Szejgiec-Kolenda, B., Śleszyński, P., Lüer, C., Böhme, K., Nedovic-Budic, Z., Williams, B., Varghese, J., Colic, N., Knaap, G., Csák, L., Faragó, L., Mezei, C., Pálné, I., Pámer, Z., Reimer, M. and Münter, A. (2018), *COMPASS – Comparative Analysis of Territorial Governance and Spatial Planning Systems in Europe – Applied Research 2016-2018 – Final Report*, ESPON and TU Delft. [Online] Available at: research.tudelft.nl/en/publications/compass-comparative-analysis-of-territorial-governance-and-spatia [Accessed 12 October 2023].

Panerai, P., Depaule, J.-C. and Demorgon, M. (1999), *Analyse Urbaine*, éditions Parenthèses, Marseille.

Poli, D. (2017), “Processi storici e forme della rappresentazione identitaria del territorio”, in *Scienze del Territorio*, vol. 5, pp. 42-53. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Scienze_Territorio-22230 [Accessed 12 October 2023].

Roest, H. A., Weitkamp, G., van den Brink, M. and Boogaard, F. (2023), “Mapping spatial opportunities for urban climate adaptation measures in public and private spaces using a GIS-based Decision Support Model”, in *Sustainable Cities and Society*, vol. 96, article 104651, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2023.104651 [Accessed 12 October 2023].

Rossi, A. (1966), *L'Architettura della Città*, Marsilio,

Padova.

Salzano, E. (2008), “Sull'articolazione dei piani urbanistici in due componenti – Come lo volevamo, come è diventata, come sarebbe utile”, in *Notiziario dell'Archivio Osvaldo Piacentini*, n. 11-12, tomo 2, pp. 17-26. [Online] Available at: yumpu.com/it/document/read/16029448/notiziario-dellarchivio-osvaldo-piacentini-caire [Accessed 12 October 2023].

Salzano, E. (1995), “Il dibattito sul Piano – Dal Piano alla Pianificazione, dalla quantità alla qualità”, in *CRU – Critica della Razonalità Urbanistica*, n. 3, pp. 28-35.

Secchi, B. (2015), *Il futuro si costruisce giorno per giorno – Riflessioni su spazio, società e progetto*, Donzelli, Roma.

Secchi, B. (2013), *La città dei ricchi e la città dei poveri*, Laterza, Roma-Bari.

Secchi, B. (2005), *La città del ventesimo secolo*, Laterza, Roma-Bari.

Secchi, B. (2000), *Prima lezione di urbanistica*, Laterza, Roma-Bari.

Secchi, B. (1997), *Un progetto per l'urbanistica*, Einaudi, Torino.

Secchi, B. and Viganò, P. (eds) (2009), *Antwerp – Territories of a new modernity*, SUN, Amsterdam.

Stanganelli, M. and Bruni, F. (2017), “Il progetto dell'incertezza”, in *CRIOS | Critica degli Ordinamenti Spaziali*, vol. 14, pp. 29-43. [Online] Available at: doi.org/10.3280/CRIOS2017-014004 [Accessed 12 October 2023].

Stanganelli, M., Torrieri, F., Gerundo, C. and Rossitti, M. (2020), “An integrated strategic-performance planning methodology towards enhancing the sustainable decisional regeneration of fragile territories”, in *Sustainable Cities and Society*, vol. 53, article 101920, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2019.101920 [Accessed 12 October 2023].

Trisciuglio, M. (2021), “Diy-City e internet of things – Un'ipotesi di ricerca intorno alla progettazione urbana interattiva | Diy-City and internet of things – A research hypothesis around interactive urban design”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 10, pp. 46-55. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1042021 [Accessed 19 October 2023].

Trisciuglio, M., Barosio, M., Ricchiardi, A., Tulumen, Z., Crapolichio, M. and Gugliotta, R. (2021), “Transitional Morphologies and Urban Forms – Generation and Regeneration Processes – An Agenda”, in *Sustainability*, vol. 13, issue 11, article 6233, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su13116233 [Accessed 12 October 2023].

Turk, D. (2023), “Artificial Intelligence and Urban Block – Building the Common Language”, in *Nexus Network Journal*, vol. 25, Suppl. 1, pp. 491-497. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00004-023-00705-4 [Accessed 12 October 2023].

UN General Assembly (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, A/RES/70/1. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 19 October 2023]

Union Internationale des Architects (1996), *Presente y futuros – Arquitectura en las ciudades*, Actar, Barcelona.

Viganò, P. (2010), *I territori dell'Urbanistica – Il progetto come produttore di conoscenza*, Officina, Roma.

ARTICLE INFO

Received	15 September 2023
Revised	04 October 2023
Accepted	31 October 2023
Published	31 December 2023

NON SOLO PELLE

Modulo oggetto e modulo misura nella composizione dell'involucro architettonico

NOT JUST SKIN

Object module and measure module in the composition of the architectural envelope

Paola Scala

ABSTRACT

Il paper indaga sul ruolo del modulo nella composizione dell'involucro esterno degli edifici. L'occasione della call proposta dalla rivista Agathón diventa il pre-testo per avviare una riflessione che, ripartendo dalla celebre distinzione di Argan tra modulo-oggetto e modulo-misura, punta a evidenziare la relazione che esiste tra il modo in cui gli architetti concepiscono l'involucro e il paradigma spaziale cui fanno riferimento. Obiettivo dello scritto è quello di riportare l'attenzione dei progettisti sull'importanza di riflettere su qualità architettonica dell'involucro e sulla sua capacità espressiva delle facciate, soprattutto in considerazione dell'attuale momento storico in cui le ragioni ambientali, culturali ed economiche impongono con sempre maggiore urgenza il passaggio dalle tradizionali tecniche costruttive ai sistemi di assemblaggio a secco.

This paper investigates the role of the module in the composition of the external envelope of buildings. The opportunity presented by the call proposed by the Agathón journal serves as a pretext to initiate a reflection that, starting from Argan's well-known distinction between object-module and measure-module, aims to highlight the relationship that exists between how architects conceive the envelope and the spatial paradigm to which they refer. The objective of this essay is to bring the attention of designers back to the importance of reflecting on the architectural quality of the envelope and its expressive capacity of façades, especially in consideration of the current historical moment in which environmental, cultural, and economic reasons increasingly urgently demand the transition from traditional construction techniques to dry assembly systems.

KEYWORDS

composizione, modulo, pelle, facciata, progetto urbano

composition, module, skin, façade, urban design



Paola Scala, Architect and PhD, is an Associate Professor of Architectural and Urban Design at the Department of Architecture (DiARC) at the 'Federico II' University of Naples (Italy). She is a member of the PhD Programme in Architecture for the Ecological Transition between Indoor Spaces and the Landscape at the University of Palermo. Her work focuses on architectural and urban design, specifically emphasising modifying tools, models, and compositional techniques in contemporary times. E-mail: paola.scala@unina.it

La crisi ambientale che sta investendo il nostro pianeta impone un cambio di paradigma anche al progetto di architettura; in particolare nell'ambito dei finanziamenti del PNRR è evidente la tendenza a premiare i progetti che utilizzano sistemi di assemblaggio a secco, reversibili e modulari. Questa scelta, indubbiamente vincente da un punto di vista ambientale, si traduce talvolta in risultati non propriamente felici dal punto di vista compositivo in particolare nelle facciate degli edifici, dove il 'modulo', talvolta coincidente con il pannello di finitura, viene spesso assunto acriticamente, mortificando, di fatto, gli esiti del progetto di architettura.

La questione del rapporto tra processo creativo e produzione industriale, che ha caratterizzato gran parte del dibattito architettonico del secolo scorso non è, ovviamente, oggetto di discussione. Già negli anni '20 Le Corbusier sottolineava che lo standard rappresenta un principio di qualità che tiene insieme la dimensione etica / economica ed estetica del progetto e che l'architettura costruita con elementi prodotti in serie, è tra le espressioni artistiche più compiute dal momento che risponde alle esigenze non di un singolo individuo ma dell'intera collettività: «Il lavoro in serie esige la ricerca dello standard. Lo Standard conduce alla perfezione» (Le Corbusier, 1924, p. 88).

Secondo Argan (1965, p. 113) lo standard (che non è un tipo di forma ma un tipo di oggetto), «[...] ha preso il posto che aveva, nel processo della progettazione classica, il modulo: tanto da potersi affermare che la grande scoperta dell'architettura moderna è la sostituzione del modulo-oggetto al modulo-misura». Lo scarto che si consuma tra il modulo-misura e il modulo-oggetto non è solo un 'fatto' strumentale, ma l'espressione di un diverso modo di concepire il manufatto architettonico e il sistema di relazioni che lo determina. «Nel passaggio tra un elemento generatore che è un tipo di forma a uno che è un tipo di oggetto, l'architettura non si definisce più né attraverso il posto, che occupa nello spazio, né nel suo rapporto con la natura, ma esclusivamente attraverso la funzione» (Petruccioli, 1977, p. 166).

Per Argan (1965, p. 113) infatti «[...] in tema di concezione dello spazio il principio di modulo-oggetto, pensandosi l'oggetto in rapporto alla sua funzione pratica, apre nuovi e imprevedibili orizzonti. Le funzioni sono complesse di vario raggio, interferenti: impossibile ridurle alla progressione aritmetica, per multipli e sottomultipli che governa tanto la 'commodulatio' quanto la proporzionalità e la prospettiva classiche. Il nuovo spazio che si determina dallo sviluppo delle singole funzioni e dal loro convergere e comporsi in quella conclusiva e unitaria funzione che è la vita stessa della società, nel suo continuo produrre e prodursi, sarà dunque uno spazio dalle dimensioni e direzioni infinite: un 'continuo' spazio temporale, lo spazio dell'umana esistenza dell'azione». A distanza di sessant'anni dal momento in cui è stato scritto il testo di Argan rappresenta una possibile chiave di lettura per comprendere meglio la molteplicità di posizioni che caratterizzano l'attuale panorama architettonico.

Il presente paper non vuole proporsi come storia dell'evoluzione dei concetti di modulo misura e di modulo oggetto, ma come una lettura critico-interpretativa che, attraverso la proposizione di un punto di vista (forse originale) con cui vengono se-

lezionate e lette alcune architetture considerate esempio di processi compositivi e/o progettuali differenti, prova a ricostruire le ragioni teoriche e tecniche di due paradigmi architettonici differenti.

Il primo, erede della tradizione disciplinare della 'modificazione' (Gregotti, 1984), prova a costruire, attraverso il progetto, una struttura di relazioni con il contesto e considera la 'facciata' di un edificio come il risultato di una composizione 'commodulata' ai caratteri del luogo nel quale si inserisce. Il secondo paradigma, portando alle estreme conseguenze le premesse sui cui fonda l'interpretazione di Argan del modulo oggetto, individua l'edificio come un oggetto autonomo espressione di una dinamica tutta interna al processo progettuale, fondato su parametri di ottimizzazione della forma e/o delle prestazioni ambientali ed energetiche.

L'ipotesi di fondo è che evidenziare questa differenza, riflessa in una differente interpretazione della relazione tra spazio interno ed esterno, qui tradotta strumentalmente nella dicotomia facciata / pelle, possa di fatto contribuire alla costruzione di un campo di riflessione comune ai due approcci che tenga conto di tutte le ragioni del luogo.

Atto primo: l'origine della dicotomia | In un racconto caratterizzato da una lettura critica e interpretativa di architetture-esempio, la figura di Mies van der Rohe può essere interpretata come la cuspide nella parabola altalenante tra i due paradigmi cui si è accennato. Da un lato, tutta l'opera di Mies è caratterizzata dalla ricerca della 'esattezza', «[...] la perfezione logica degli edifici costruiti da Mies, la loro apparente banalità cela un lavoro paziente su pochi ma essenziali elementi che di volta in volta sono messi 'a contrasto' a partire da regole e relazioni d'ordine chiaramente espresse. La volontà di misurare e misurarsi con la natura naturata si traduce in leggi, regole, moduli, misure, in elementi, piani, sostegni di cui Mies si serve per portare alla perfezione – come direbbe Boullée – i suoi edifici» (Capozzi, 2010, p. 30).

Dall'altro la funzione è per Mies, come si è detto, un concetto molto fluido che determina uno spazio dinamico e che porta alla dissoluzione della scatola, tema che il Maestro perseguirà per tutta la sua esistenza. Una ricerca che parte da lontano, sin da quando il giovane architetto tedesco comincia a lavorare, nello studio di Behrens, al progetto della facciata secondaria dell'AEG di Berlino (Fig. 1), interamente sviluppata con elementi 'standard' e caratterizzata da un elegantissimo gioco compositivo di relazioni geometriche che usa gli 'oggetti' per costruire una sofisticata struttura di relazioni tra misure (Fig. 2).

La parte fissa della vetrata è infatti caratterizzata dalla giunzione priva di nodi, brevettata all'inizio del Novecento dalla ditta Fenestra Düsseldorf, che disegna una griglia modulare di cinque moduli nella zona inferiore della facciata e di quattro in quella superiore. La variazione che caratterizza le due parti non è solo formale ma funzionale in quanto legata alla necessità che «[...] i pilastri di quella inferiore sorreggano non solo la struttura dell'edificio ma anche il carico dinamico di una gru mobile operante nel cortile, montata sulla trave metallica che regge il solaio del lungo corpo laterale» (Heuser, 1998, p. 16).

Questa differenza nella dimensione delle strutture verticali viene assorbita dalla suddivisione del-

la trave in 'metope' scandite da triglifi metallici che raccordano la scansione delle linee verticali in base al ritmo stabilito dal modulo-oggetto e dalla sua metà (Fig. 3). La linea di mezzera del pilastro inferiore passa per il triglifo risultando perfettamente allineata al montante superiore nelle due estremità del campo vetrato, mentre in mezzera il montante centrale della campata superiore, ripartita in quattro campi verticali, risulta perfettamente allineato al triglifo della trave e si identifica come asse di simmetria della campata inferiore suddivisa in tre superfici vetrate.

L'effetto che se ne ricava complessivamente è quello di un curtain wall anche se, da un punto di vista costruttivo, si tratta di una soluzione completamente diversa. In questo progetto Behrens, con l'aiuto di Mies, raggiunge un risultato formale che travalica la semplice esibizione di un dato tecnico (Heuser, 1998), intuendo il vero significato della 'pelle'; una lezione intuita da allievo che il Maestro tradurrà nell'immagine del Friedrichstrasse Skyscraper Project, Berlin-Mitte, e attuerà nel Seagram Building: «Mies van der Rohe referred to this concept as an architecture of 'skin and bones'» (MoMA, n.d.).

La rottura del binomio forma / funzione, che sancisce la definitiva crisi del Movimento Moderno, ha dato origine a 'correnti diverse': da un lato la ricerca di chi, sottolineando le derive di un 'funzionalismo ingenuo', richiama alla necessità di una teoria dell'architettura fondata sul predominio della forma, come idea stabile e interna alla disciplina che si traduce in un 'fatto urbano concreto' (Rossi, 1966); dall'altro chi invece dissolve la forma in un'architettura fatta di diagrammi e flussi che raccontano di una città dove la morfologia urbana tradizionale scompare per lasciare il posto a spazio fluido e continuo.

Come si è detto, al di là della narrazione dominante, nel Movimento Moderno l'idea di funzione non è mai stata interpretata in maniera univoca. «[...] Non tutta l'esperienza dell'architettura moderna è raccogliibile sotto il vessillo del Funzionalismo, la cui fase propulsiva durò, in realtà, pochi anni; inoltre, neppure tra gli architetti d'avanguardia le posizioni furono così univocamente funzionaliste. Certamente vi fu dibattito tra chi era incline a un certo determinismo funzionale e chi invece lo rifuggiva» (Bilò, 2014, p. 359).

Federico Bilò riporta a tal proposito il racconto di Peter Blundell Jones a proposito del confronto tra Mies van Der Rohe e Hugo Häring sul progetto di una casa di campagna: la proposta di Mies è quella della 'villa in mattoni', un diagramma nel quale la disposizione di alcuni oggetti articola uno spazio fluido, aperto ad accogliere usi diversi attuando la dissoluzione del confine tra interno ed esterno; Haring progetta invece una casa dalle curve nette e definite secondo un'interpretazione deterministica del binomio forma / funzione.

Mies ne aveva un'idea diversa: «[...] fai i tuoi spazi grandi a sufficienza, uomo, così da poterti camminare liberamente, e non solo in una direzione predeterminata. O sei del tutto sicuro di come quelli verranno usati? Noi non sappiamo affatto se la gente ne farà l'uso che noi ci attendiamo. Le funzioni non sono così chiare né così costanti: esse cambiano più rapidamente dell'edificio (Mies cit. in Bilò, 2014, p. 360). Con tale pensiero Mies persegue quello che Peter Blake (1983, p. 39) ha chiamato lo 'spazio universale': «[...] il

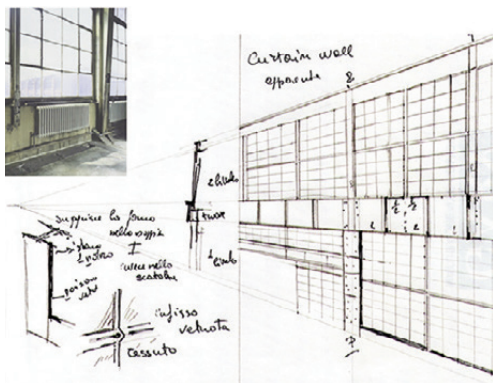
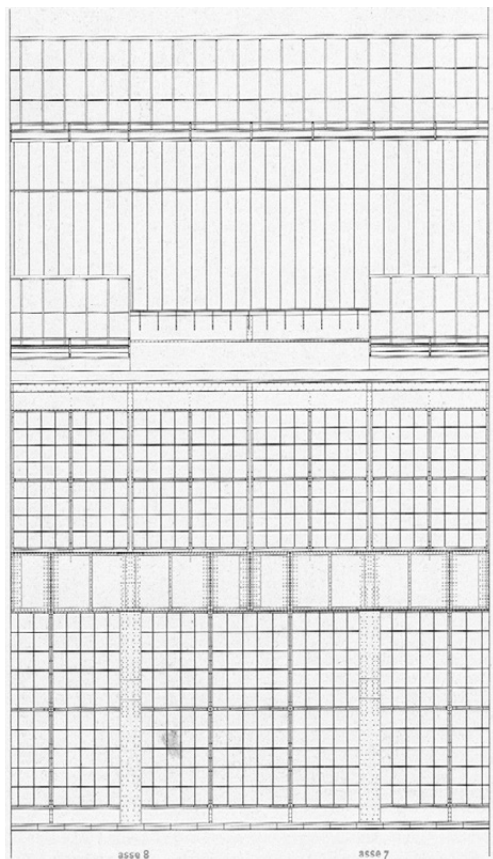


Fig. 1-3 | AEG Building in Berlin, designed by Peter Behrens: The secondary façade; The elevation section of the rear façade; Analysis of the rear façade (source: Casabella, vol. 651/2, 1998).

concetto è semplice: dal momento che oggi è estremamente difficile prevedere quelle che saranno le funzioni future, si dovrebbero progettare edifici talmente flessibili da accogliere facilmente e favorire tutte le possibili funzioni ad essi richiesti dalle generazioni future».

Atto secondo: ascesa del modulo oggetto |

Qualche anno dopo Rem Koolhaas (1989) sulla stessa lunghezza d'onda articola il concetto di Programmatic Instability, connesso a quello di un'architettura intesa non come esito formale, ma piuttosto come processo aperto che costruisce le condizioni per accogliere l'intreccio di flussi e usi che caratterizza la società contemporanea. In questa logica il progetto non si limita a costruire uno spazio 'flessibile', ovvero in grado di consentire lo svolgimento di tutte le funzioni previste, bensì 'aperto' (Pota, 2021) cioè capace di accogliere e, soprattutto, attivare usi ed eventi imprevisi.

La Programmatic Instability porta in scena l'idea della cultura della congestione, già messa a fuoco nel libro *Delirious New York* dove il 'grattacielo' diventa «A machine to generate and intensify desirable forms of human intercourse» (Koolhaas, 1978, p. 152). La congestione interpreta il modo di vivere della società contemporanea nella quale si incontrano, scontrano e sovrappongono attività incerte e imprevisibili e il grattacielo, così come inteso da Koolhaas, sembra essere la traduzione di quello spazio dell'umana esistenza dell'azione, generato attraverso il modulo oggetto, di cui scriveva Argan nel 1965.

La Città del Globo Prigioniero (Fig. 4) è un progetto (immaginario) del 1972, costituito da una serie di paradigmi dell'architettura moderna e contemporanea montati su alcuni moduli oggetto, ovvero dei blocchi di granito che scandiscono una griglia al centro della quale vi è un 'blocco al negativo' (uno scavo) che imprigiona un globo. Ciascun blocco rappresenta un laboratorio ideologico, una sorta di elemento che media tra la griglia (l'elemento razionale) e il 'grattacielo' (l'elemento irrazionale) all'interno del quale vengono sospese tutte le 'leggi indesiderate' (Koolhaas, 1978).

La Città del Globo Prigioniero da un lato rappresenta l'immagine sintetica di Manhattan così come Koolhaas la ricostruisce in un manifesto retroattivo, dall'altro costruisce anche la sua interpretazione del Grattacielo, l'edificio che attraverso la 'lobotomia' e lo scisma sancisce la separazione tra la forma esterna dell'architettura, alla quale vengono demandati tutti i problemi formali, e quella interna, costruita per parti autonome relazionate da un programma 'aperto' e suscettibile di infinite variazioni (Scala, 2021).

Dal punto di vista tecnico la 'lobotomia' tra spazio interno e esterno può, in ultima analisi, tradursi nel concetto di 'pelle' ovvero in quello di una membrana osmotica che diventa l'espressione più compiuta di uno spazio dinamico, fluido, indifferente ai concetti di interno ed esterno, uno spazio non euclideo ma 'topologico', nel quale il concetto di modulo non ha più alcuna relazione con la 'commodulatio' vitruviana ma diventa un 'oggetto' che si deforma in virtù di processi di 'ottimizzazione' della forma e/o si piega e muove in relazione a stimoli ambientali esterni.

Secondo Del Giudice (2012, p. 8) «La nuova generazione di sistemi di progettazione parametrica stabilisce dei modelli definiti da un insieme di rap-

porti vincolati di oggetti, in altre parole il processo consente di impostare modalità parametriche geometriche in grado di costruire variazioni previste tra gli oggetti». Tra gli esempi emblematici di questo approccio, laddove con emblematico si intende un'opera che ha portato a completa espressione le sue premesse (De Fusco, 1974), è possibile ascrivere il Grand Théâtre di Rabat (2010-2023; Fig. 5), progettato dallo studio Zaha Hadid, caratterizzato da un involucro in pannelli in GRC (fibrogesso) che rivestono tutta la superficie di forma amorfa per un totale di 5.400 moduli, ognuno diverso dall'altro (Figg. 6, 7). La complessa geometria dell'edificio ha reso necessario un approccio integrato al progetto che, partendo dal modello tridimensionale generato dallo Studio Zaha Hadid e dai vincoli stabiliti dai progettisti, ha portato alla definizione delle diverse tipologie di pannelli generate da un processo di ottimizzazione della forma sviluppato attraverso i software di progettazione Rhino e Grasshopper.

Il rapporto tra queste architetture e il contesto è profondamente diverso da quello dell'architettura classica, vuoi per le grandi dimensioni, in quanto superata una certa massa l'architettura rompe qualsiasi relazione con il tessuto urbano nel quale si inserisce (Koolhaas and Mau, 1995), vuoi perché molti di questi progetti si identificano, nell'immaginario collettivo, con la loro stessa 'pelle' e non partecipano alla costruzione di contesti urbani ma ambiscono a diventare icone della contemporaneità; sono essi stessi oggetti che stabiliscono con il luogo relazioni che non sono 'compositive' ma 'funzionali', laddove questo termine, nella sua dimensione più ampia, comprende non solo le dinamiche sociali e culturali ma anche, quelle ambientali ed economiche.

È il caso del Padiglione della Biodiversità del Messico (Fig. 8), progettato da Fernanda Ahumada e dallo studio FR-EE, dove la superficie circolare dell'edificio, che metaforicamente rappresenta l'interconnessione tra esseri viventi, è ricoperta da moduli di alluminio (Fig. 9) disposti in maniera tale da regolare la luce all'interno. «The wave of thousands of aluminium modules on the building was designed to respond to the interior environment by covering the glass façade where the space inside requires less light. The dynamic cladding follows the curve of the building, which is higher towards the south and completely closed off in some sections, with no glass, such as the area that corresponds to the auditorium. The aluminium panels measure 30 x 20 centimetres and respond to the surrounding site by moving with the wind, alluding to the 'permanence and importance' of biodiversity and creating a 'living facade'» (Eberhardt, 2023).

Atto terzo: verso una nuova idea di standard, sintesi modulo-oggetto e misura |

Il Grand Théâtre di Rabat e il Padiglione della Biodiversità del Messico sono esempi di un approccio progettuale, fondato su un'idea di modulo oggetto, che ha nel tempo certamente prodotto opere di grande qualità (sebbene spesso al centro di accesi dibattiti). Di contro il progetto di architettura fondato sull'idea di appartenenza a un luogo non sempre riesce a declinare attraverso un'immagine sintetica le ragioni della forma urbana con la necessità di rispondere ai cambiamenti tecnologici imposti dalle sfide della contemporaneità. Questo

approccio – azzarderemmo dire profondamente italiano – che lavora a partire dalla conoscenza e dall'interpretazione dei contesti traducendone i caratteri nella forma (stabile e duratura) degli edifici, spesso ha difficoltà a operare lo switch verso tecnologie costruttive profondamente differenti (prima di tutto dal punto di vista concettuale) da quelle dei luoghi nei quali si inserisce.

In molti casi, di conseguenza, la necessità di adottare sistemi di costruzione a secco, dettata da ragioni di sostenibilità economica e ambientali, viene 'subita' e non interpreta un effettivo cambio di paradigma con il risultato che l'immagine dell'edificio appare totalmente estranea alle tecniche adottate (Fig. 10). Questa condizione appare evidente soprattutto nella composizione delle facciate dove la scelta di utilizzare elementi standard non determina necessariamente un cambio di linguaggio con un risultato che potremmo definire 'postmoderno', dando a questo termine la sua accezione più negativa.

A questo proposito Luigi Prestinzenza Puglisi (2017) sostiene che in Italia, dove «[...] la qualità richiesta è minima e i sistemi costruttivi rudimentali, la pelle dell'edificio diventa spesso un gioco che si limita a bucherellare i prospetti in un modo stucchevole come la musicchetta di un jingle». Tuttavia ponendosi in una prospettiva più generosa si potrebbe sostenere che gli architetti italiani non riescono, in molti casi, ad attuare il passaggio tra il concetto di modulo-misura e modulo-oggetto perché una parte dell'architettura italiana, per la sua identità fortemente connessa a una tradizione disciplinare classica, non può e non vuole aderire ad un paradigma progettuale e spaziale che sembra appartenere ad approcci di tipo anglosassone.

Particolarmente interessanti da questo punto di vista sono alcune architetture di Cino Zucchi a proposito del quale sempre Luigi Prestinzenza Puglisi (2017) scrive: «[...] sarebbe ingeneroso accusare Zucchi di limitarsi a disegnare i prospetti. Basta vedere i suoi progetti urbani per capire che spesso vi è un felice lavoro sui volumi e sull'organizzazione degli spazi pubblici». La frase tradisce un sostanziale atteggiamento di generale sufficienza verso l'architettura che 'si limita a disegnare prospetti', liquidando l'operazione alla sola espressione della cifra linguistica dell'architetto.

Ciò che sembra però sfuggire al critico di architettura è il fatto che nell'architettura italiana la facciata di un edificio è (quasi) sempre, contemporaneamente, figura del significante architettonico – l'edificio – e di quello urbano (De Fusco, 1978) e che dunque il disegno dell'involucro è di per sé connesso all'idea dello spazio pubblico. Tuttavia, seppure volessimo limitare il nostro sguardo al solo disegno del prospetto ci sarebbe da sottolineare che quelli disegnati da Zucchi sono spesso l'espressione coerente di un lavoro compositivo, ben strutturato all'interno del quale è possibile rintracciare strutture narrative diverse ma sempre chiare ed evidenti (Fig. 11).

Nel numero di Area dedicato ai lavori del suo Studio, Cino Zucchi racconta, in maniera piuttosto divertita, di quando Antonio Monestirolì incontrandolo gli avrebbe chiesto, scherzando, di disconoscere il progetto dell'Office Building U15 Milanofiori di Assago, rifiutandosi di credere che l'edificio potesse essere stato progettato dallo stesso architetto che aveva progettato la casa a Venezia.

Il siparietto riproposto nel dialogo tra se stesso e il Maestro milanese è espressione delle diverse posizioni che caratterizzano la cultura architettonica italiana. Da un lato c'è quella interpretata da Monestirolì, per la quale il significato dell'architettura va ricercato principalmente nella sua forma, espressione del tema che l'architetto persegue 'ostinatamente' per tutta la sua esistenza e che necessita di una coerenza di 'linguaggio', dall'altra quella di Zucchi che, proponendo un paragone tra la sua architettura e la filmografia di Stanley Kubrick, risponde che «[...] tra gli Haedquarters della Salewa / Arancia Meccanica e la casa di Venezia / Barry Lyndon non esiste alcuna parentela formale, ma solo un tentativo di trovare spazi e figure giuste per ogni 'circostanza', per ogni tema, per ogni contesto specifico: un edificio-réclame in un paesaggio alpino o una casa popolare nel tessuto della Giudecca» (Casamonti, Tamburelli and Zucchi, 2012, p. 7).

È attraverso la 'variazione' che gli edifici disegnati dallo studio CZA sembrano riuscire a catturare il carattere dei luoghi esaltandone la dimensione plurale. La variazione genera una figura 'appropriata', capace di far scattare un meccanismo di associazione analogica tra la nuova architettura e i contesti nei quali si inserisce. I prospetti dell'architetto milanese sono costruiti intorno a questo tema, sia quando sono sviluppati con tecniche di tipo tradizionale sia quando sono assemblati a secco, ma nei due casi i risultati espressivi che ne conseguono sono molto diversi.

Nel caso della Giudecca (Figg. 12, 13), la disposizione eccentrica di alcune bucatore, enfatizzata dalla variazione nella dimensione e disposizione delle cornici, finisce con accentuare la percezione stereometrica del volume regolare dell'edificio. Nel caso della Nuvola Lavazza New Headquarters (Fig. 14), Zucchi lavora invece sul versante della smaterializzazione dell'edificio attraverso una elegante facciata (Fig. 15) composta da 1.400 moduli caratterizzati da 1.200 variazioni. «Grande rilevanza ha assunto la standardizzazione in questa commessa, riferita all'intero processo produttivo anziché alle singole componenti, alle quali è lasciata libertà nella personalizzazione degli elementi [...]». Per la presente commessa, la multinazionale Schüco ha prodotto appositamente 26 matrici diverse per altrettante tipologie di profilo componenti la facciata» (Aimar, 2016).

Ovviamente il valore del Complesso della Lavazza, sia dal punto di vista urbano che architettonico, non è sintetizzabile nel singolo edificio né tantomeno nella sola facciata. Tuttavia quello che ai fini del presente articolo interessa sottolineare è la capacità del progettista di cogliere l'occasione di declinare, attraversando scelte tecnologiche differenti, il fil rouge della propria ricerca.

La 'incoerenza linguistica' che caratterizza l'architettura di Cino Zucchi non è una scelta né probabilmente un obiettivo, è semplicemente l'esito di un processo che, come lui stesso sostiene, cerca 'figure' in grado di costruire e inserirsi nei contesti, laddove con questo termine non sono compresi solo i tessuti urbani preesistenti, ma anche i contesti immateriali delle scelte ambientali, funzionali, sociali ed economiche che vengono sintetizzate e riassunte nell'immagine dell'edificio. I bellissimi schizzi (Fig. 16) pubblicati nel volume Cino Zucchi – Inspiration and Process in Architecture (Bassoli, 2014) suggeriscono a chi li guarda la pos-

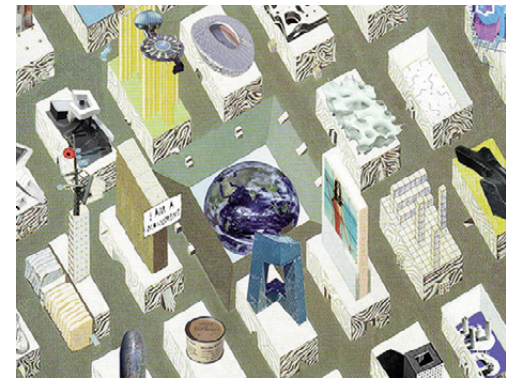


Fig. 4 | The City of the Captive Globe (credit: R. Koolhaas, 1972).

sibilità di lavorare dentro una cultura architettonica che ragiona, con orgogliosa leggerezza, per moduli, griglie e ritmi, rivendicando la libertà di rompere, con consapevolezza, le regole.

Riflessioni conclusive | L'approccio progettuale di Cino Zucchi non è certamente unico nel panorama architettonico contemporaneo, tuttavia in questo articolo viene assunto come esemplificativo di una capacità di ibridare punti di vista differenti (certamente esito di una formazione orgogliosamente rivendicata come ibrida) e di interpretare le esigenze poste dalla contemporaneità senza rinunciare alla coerenza del proprio percorso di ricerca. Le riflessioni sviluppate nell'ambito del saggio sono maturate nell'ambito di una condizione tipicamente 'italiana' che negli ultimi anni ha portato a una progressiva scomposizione dell'architettura in settori disciplinari e un altrettanto progressiva divaricazione tra ricerca e pratica professionale. Questa condizione si è tradotta, talvolta, nella crescente indifferenza verso gli aspetti teorici che determinano l'invenzione di nuovi paradigmi spaziali e che si materializzano in 'immagini' architettoniche differenti, spesso considerate solo come la cifra linguistica di uno specifico architetto.

La lettura critica proposta prova a costruire un territorio dell'architettura comune e trasversale tra discipline diverse utilizzando il pre-testo (il saggio di Argan) che, nell'individuare la dicotomia tra modulo oggetto e modulo misura, ha forse segnato la progressiva scissione tra due linee di ricerca: da un lato quella che indaga sulla dimensione prestazionale dell'architettura e, dall'altro, quella fondata sull'idea di 'autonomia' della disciplina che, spesso, sembra slittare sulla realtà.

In questo contesto si ritiene possa avere senso una riflessione che, a partire dal significato del concetto di modulo in epoca contemporanea, provi a ragionare sui differenti paradigmi architettonici che definiscono la differenza tra il concetto di 'facciata' e di 'pelle' e a indagare sulle potenzialità espressive dell'elemento prefabbricato inteso non solo come componente tecnologico, al quale affidare la performance dell'involucro dal punto di vista energetico e ambientale, ma anche come modulo compositivo 'dinamico', capace di costruire e risignificare contesti urbani e di creare architetture che non si pongano come oggetti conclusi in sé. In una tale ottica può prendere corpo una nuova idea di standard, connessa all'Industria 4.0, che investe più i processi produttivi che i singoli oggetti e che

consente di coniugare le risposte in termini economici e ambientali con le ragioni di un progetto di architettura capace di ricucire la dicotomia tra modulo oggetto e modulo misura.

The environmental crisis affecting our planet necessitates a paradigm shift in architecture design. Particularly within the funding framework provided by the Italian National Recovery and Resilience Plan (NRRP), there is a clear trend towards favouring projects that employ dry, reversible, and modular assembly systems. This environmentally sound choice, while undoubtedly advantageous, sometimes leads to less than satisfactory compositional results, especially in building façades, where the 'module', often coinciding with the finishing panel, is frequently adopted uncritically, effectively undermining the architectural design outcomes.

The issue of the relationship between the creative process and industrial production, which has characterised much of the architectural discourse of the last century, needs to be addressed. As early as the 1920s, Le Corbusier emphasised that the standard represents a principle of quality that unites the ethical, economic, and aesthetic dimensions of a project, and that architecture constructed with mass-produced elements is among the most accomplished artistic expressions, as it responds to the needs not of an individual but of the entire community: 'mass production demands the pursuit of the standard; the Standard leads to perfection' (Le Corbusier, 1924, p. 88).

According to Argan (1965, p. 113), the standard (which is not a type of form but a type of object) has taken the place that the module held in the process of classical design: so much so that it can be said that the great discovery of modern ar-

chitecture is the substitution of the object-module for the measure-module. The gap that is consummated between the measure-module and the object-module is not just an instrumental 'fact', but the expression of a different way of conceiving the architectural artifact and the system of relations that determines it. According to Petruccioli (1977), in the transition between a generating element that is a type of form to one that is a type of object, architecture is no longer defined either through the place, which it occupies in space, or in its relation to nature, but exclusively through function.

For Argan (1965), on the subject of the conception of space, the principle of object-module, thinking the object in relation to its practical function, opens up new and unpredictable horizons. The functions are complex of various ranges, interfering: impossible to reduce them to the arithmetic progression, by multiples and submultiples that governs both 'commodulatio' and classical proportionality and perspective. The new space that is determined by the development of the individual functions and by their convergence and compounding into that conclusive and unitary function which is the very life of society, in its continuous production and manufacture, will thus be a space of infinite dimensions and directions: a 'continuous' temporal space, the space of the human existence of action. Sixty years after it was written, Argan's text represents a possible key to better understanding the multiplicity of positions that characterise the current architectural landscape.

The present paper does not aim to provide a history of the evolution of the concepts of measurement module and object module but rather serves as a critical-interpretive reading. By presenting a (possibly original) perspective in which certain architectural examples, considered representative of different compositional and/or design

processes, are selected and analysed, it attempts to reconstruct the theoretical and technical rationales behind two distinct architectural paradigms.

The first paradigm, rooted in the disciplinary tradition of 'modification' (Gregotti, 1984), seeks to create, through design, a structure of relationships with the context and views the 'façade' of a building as the result of a composition that is 'commodulated' according to the characteristics of the site in which it is situated. The second paradigm, pushing to the extreme the premises on which Argan's interpretation of the object module is based, identifies the building as an autonomous object expressing an entirely internal dynamic within the design process. This dynamic is founded on parameters for optimising form and/or environmental and energy performance.

The underlying hypothesis is that highlighting this difference, reflected in a different interpretation of the relationship between interior and exterior space, here instrumentally translated into the façade / skin dichotomy, may contribute to the construction of a common field of reflection between the two approaches that takes into account all the reasons for the place.

Act one: the origin of the dichotomy | In a narrative characterised by a critical and interpretive reading of example-architectures, the figure of Mies van der Rohe can be interpreted as the cusp in the seesawing parabola between the two paradigms mentioned above. On the one hand, Mies's entire oeuvre is characterised by the quest for 'exactness', the logical perfection of the buildings constructed by Mies, their apparent banality conceals a patient work on a few but essential elements that from time to time are 'contrasted' from clearly expressed rules and relations of order. The will to measure and measure oneself against nature 'nat-

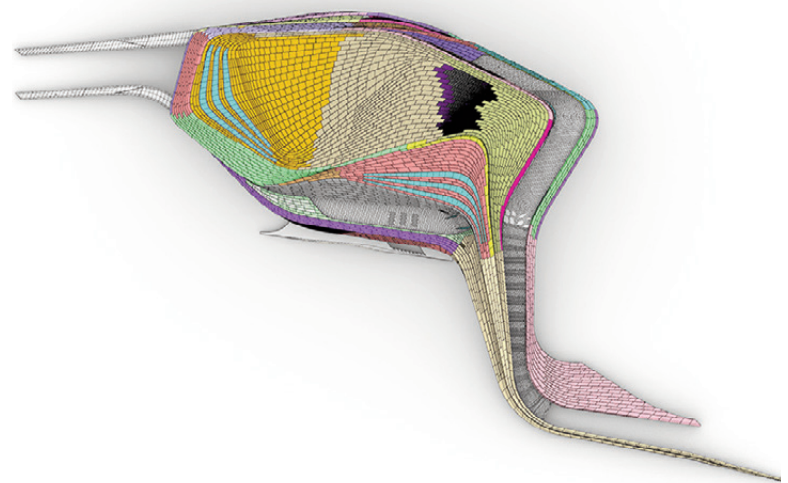


Fig. 5-7 | Grand Théâtre de Rabat (2010-2023) in Morocco, designed by Zaha Hadid Architects: The poetics of the object; Zoning related to the GRC façade panels; The laying of the skin (source: incide.co.uk).

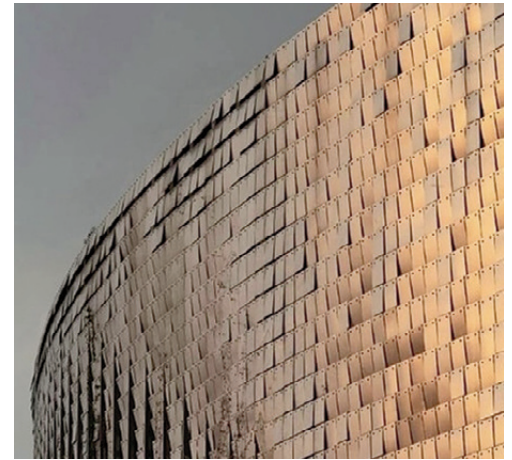
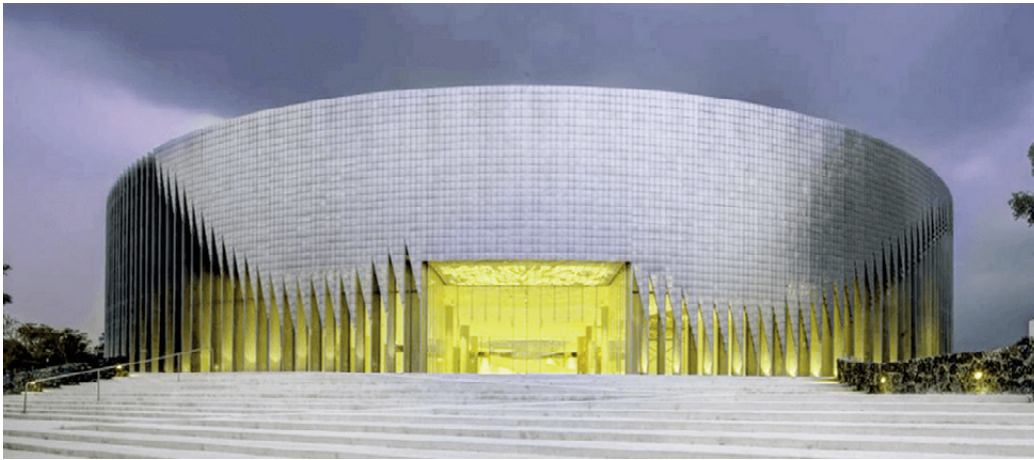


Fig. 8, 9 | Mexico Biodiversity Pavilion in Mexico City, designed by Fernanda Ahumada: shell and its detail (source: sic.cultura.gob.mx; projects.archiexpo.it).

urata' is translated into laws, rules, modules, measures, into elements, plans, and supports that Mies uses to bring his buildings to perfection – as Boullée would say (Capozzi, 2010).

On the other, the function is for Mies, as mentioned above, a very fluid concept that determines a dynamic space and leads to the dissolution of the box, a theme that the Master will pursue throughout his existence. It is a quest that starts far back, ever since the young German architect began working in Behrens' studio on the design of the secondary façade of the AEG Building in Berlin (Fig. 1), entirely developed with 'standard' elements and characterised by a very elegant compositional play of geometric relations that uses 'objects' to build a sophisticated structure of relations between measures (Fig. 2).

The fixed part of the glazing is, in fact, characterised by the knotless joint, patented in the early twentieth century by the Fenestra Düsseldorf company, which designs a modular grid of five modules in the lower part of the façade and four in the upper part. The variation that characterises the two parts is not only formal but functional in that it is linked to the need for the pillars of the lower one to support not only the structure but also the dynamic load of a mobile crane operating in the courtyard, mounted on the metal beam that supports the floor of the long side body (Heuser, 1998).

The subdivision of the beam absorbs this difference in the size of the vertical structures into 'metopes' punctuated by metal triglyphs that connect the scanning of the vertical lines according to the rhythm established by the module-object and its middle (Fig. 3). The midpoint of the lower pillar passes through the triglyph resulting perfectly aligned with the upper post in the two ends of the glazed field, while in the midpoint the central post of the upper span, divided into four vertical fields, results perfectly aligned with the triglyph of the beam and is identified as the axis of symmetry of the lower span divided into three glazed surfaces.

The effect overall is that of a curtain wall although, from a constructive point of view, it is a completely different solution. In this project, Behrens (with the help of Mies) achieves a formal result that transcends the mere exhibition of a technical datum (Heuser, 1998), intuiting the true meaning of 'skin'; a lesson intuited as a pupil that the Master would translate into the image of the Friedrichstrasse Skyscraper Project, Berlin-Mitte, and im-

plement in the Seagram Building: «Mies van der Rohe referred to this concept as an architecture of 'skin and bones'» (MoMA, n.d.).

The breakdown of the form / function pair, which sanctioned the definitive crisis of the Modern Movement, gave rise to 'different currents'. On the one hand, that research which, stressing the drifts of a 'naive functionalism', calls for the need for a theory of architecture based on the predominance of form, as a stable idea internal to the discipline that translates into a 'concrete urban fact' (Rossi, 1966); on the other, those who instead dissolve form into an architecture made of diagrams and flows that tell of a city where traditional urban morphology disappears to give way to fluid and continuous space.

As noted above, beyond the dominant narrative, in the Modern Movement the idea of function was never uniquely interpreted. According to Bilò (2014), not all the experience of modern architecture can be collected under the banner of Functionalism, whose propulsive phase lasted, in fact, only a few years; moreover, not even among the avant-garde architects were the positions so unambiguously functionalist. Certainly, there was a debate between those inclined toward a certain functional determinism and those who shunned it.

Federico Bilò reports in this regard on Peter Blundell Jones' account of the comparison between Mies van Der Rohe and Hugo Häring on the design of a country house: Mies' proposal is that of the 'brick villa', a diagram in which the arrangement of a few objects articulates a fluid space, open to accommodate different uses by implementing the dissolution of the boundary between interior and exterior; Häring, on the other hand, designs a house with sharp and defined curves according to a deterministic interpretation of the form/function binomial.

Mies (in Bilò, 2014) had a different idea and advised providing enough large spaces so that people could walk freely in them, and not just in a predetermined direction, as they could never be sure how they would be used or whether the users would make use of them as intended by the architect because functions are not so clear but variable: they change faster than the building. With such thinking, Mies pursues what Peter Blake (1983) defined the 'universal space': since it is extremely difficult today to predict what future functions will be, buildings should be designed so flex-

ible that they will easily accommodate and facilitate all possible functions required of them by future generations.

Act two: the rise of the object module | A few years later, Rem Koolhaas (1989) on the same wavelength articulates the concept of Programmatic Instability, connected to that of an architecture understood not as a formal outcome, but rather as an open process that builds the conditions for accommodating the interweaving of flows and uses that characterises contemporary society. In this logic, the project is not limited to constructing a space that is 'flexible', i.e., capable of allowing the performance of all intended functions, but rather 'open' (Pota, 2021), i.e., capable of accommodating and, above all, activating unexpected uses and events.

Programmatic Instability brings to the stage the idea of the culture of congestion, already in focus in *Delirious New York* where the 'skyscraper' becomes «A machine to generate and intensify desirable forms of human intercourse» (Koolhaas, 1978, p. 152). Congestion interprets the way of life of contemporary society in which uncertain and unforeseen activities meet, collide and overlap, and the skyscraper, as understood by Koolhaas, seems to be the translation of that space of human existence of action, generated through the object module, about which Argan wrote in 1965.

The City of the Captive Globe (Fig. 4) is a (fictional) project from 1972, consisting of a series of paradigms of modern and contemporary architecture mounted on some object modules, i.e., granite blocks that mark a grid at the centre of which there is a 'negative block' (an excavation) that imprisons a globe. Each block represents an ideological laboratory, a kind of element that mediates between the grid (the rational element) and the 'skyscraper' (the irrational element) within which all 'undesirable laws' are suspended (Koolhaas, 1978).

The City of the Captive Globe, on the one hand, represents the synthetic image of Manhattan as Koolhaas reconstructs it in a retroactive manifesto, on the other, it also constructs his interpretation of the Skyscraper, the building that through 'lobotomy' and schism sanctions the separation between the external form of architecture, to which all formal problems are devolved, and the internal form, built by autonomous parts related by an

‘open’ program and susceptible to infinite variations (Scala, 2021).

From a technical point of view, the ‘lobotomy’ between inner and outer space can ultimately be translated into the concept of ‘skin’ or that of an osmotic membrane that becomes the most accomplished expression of a dynamic, fluid space, indifferent to the concepts of inside and outside, a space that is not Euclidean but ‘topological’, in which the concept of module no longer has any relation to the Vitruvian ‘*commodulatio*’ but becomes an ‘object’ that deforms by virtue of processes of ‘optimisation’ of form and/or bends and moves in relation to external environmental stimuli.

According to Del Giudice (2012), the new generation of parametric design systems establishes patterns defined by a set of constrained relationships of objects: in other words, the process allows for the setting up of geometric parametric modes capable of constructing expected variations between objects. Among the emblematic examples of this approach, where emblematic means a work that has brought its premises to full expression (De Fusco, 1974), it is possible to ascribe the Grand Théâtre de Rabat (2010-2023; Fig. 5), designed by Zaha Hadid Architects, characterised by a shell made of GRC (fibre plaster) panels that cover the entire surface of amorphous shape for a total of 5,400 modules, each one different from the other (Figg. 6, 7). The complex geometry of the building necessitated an integrated approach to the project, which, starting from the three-dimensional model generated by Zaha Hadid Architects and the constraints established by the designers, led to the definition of the different types of panels generated by a shape optimisation process developed through Rhino and Grasshopper design software.

The relationship between these architectures and the context is profoundly different from that of classical architecture, either because of their large size, in that once a certain mass has been exceeded, the architecture breaks any relationship with the urban fabric in which it is inserted (Koolhaas and Mau, 1995), or because many of these projects

are identified, in the collective imagination, with their own ‘skin’ and do not participate in the construction of urban contexts but aspire to become icons of contemporaneity; they are themselves objects that establish relationships with place that are not ‘compositional’ but ‘functional’, where this term, in its broadest dimension, includes not only social and cultural dynamics but also, environmental and economic ones.

Such is the case with Mexico’s Biodiversity Pavilion (Fig. 8), designed by Fernanda Ahumada and FR-EE firm, where the circular surface of the building, which metaphorically represents the interconnectedness of living beings, is covered with aluminium modules (Fig. 9) arranged in such a way as to regulate the light inside. «The wave of thousands of aluminium modules on the building was designed to respond to the interior environment by covering the glass façade where the space inside requires less light. The dynamic cladding follows the curve of the building, which is higher towards the south and completely closed off in some sections, with no glass, such as the area corresponding to the auditorium. The aluminium panels measure 30 x 20 centimetres and respond to the surrounding site by moving with the wind, alluding to the ‘permanence and importance’ of biodiversity and creating a ‘living façade’» (Eberhardt, 2023).

Act three: toward a new idea of standard, module-object synthesis, and measure

Grand Théâtre de Rabat and Mexico’s Biodiversity Pavilion are examples of a design approach, founded on an idea of module-object that has over time produced works of excellent quality (though often at the centre of heated debates). In contrast, architectural design based on the idea of belonging to a place does not always succeed in declining through a synthetic image the reasons for urban form with the need to respond to technological changes imposed by contemporary challenges. This approach – we would venture to say profoundly Italian – that works from the knowledge and interpretation of contexts by translating their characters into the (stable and enduring) form of buildings, often has difficulty in making the switch to building technologies that are profoundly different (first and foremost from a conceptual point of view) from those of the places in which it fits.

Consequently, in many cases, the need to adopt dry construction systems, dictated by reasons of economic and environmental sustainability, is ‘suffered’ and does not allude to an actual paradigm shift with the result that the image of the building appears totally unrelated to the techniques adopted (Fig. 10). This condition is especially evident in the composition of the façades where the choice to use standard elements does not necessarily

determine a change of language with a result that we could call ‘postmodern’, giving this term its most negative meaning.

In this regard, Luigi Prestinenza Puglisi (2017) argues that in Italy, where the quality required is minimal and the construction systems rudimentary, the skin of the building often becomes a game that merely pokes holes in the elevations in a cloying way like the music of a jingle. However, putting a more generous perspective, it could be argued that Italian architects fail, in many cases, to implement the transition between the concept of module-measure and module-object because a part of Italian architecture, due to its identity strongly connected to a classical disciplinary tradition, cannot and will not adhere to a design and spatial paradigm that seems to belong to more Anglo-Saxon approaches.

Particularly interesting from this point of view are some architectures by Cino Zucchi, about whom Luigi Prestinenza Puglisi (2017) writes that it would be ungenerous to accuse Zucchi of merely drawing elevations: it is enough to see his urban projects to understand that there is often a happy work on volumes and the organisation of public spaces. The thought betrays a substantial attitude of general sufficiency toward the architecture that ‘merely draws elevations’, debasing the operation to the mere expression of the architect’s linguistic cipher.

What seems to have escaped the architectural critic, however, is the fact that in Italian architecture the façade of a building is (almost) always, at the same time, a figure of the architectural signifier – the building – and of the urban signifier (De Fusco, 1978) and that therefore the design of the envelope is in itself connected to the idea of public space. However, even if we wanted to limit our gaze to the design of the elevation alone we would have to emphasise that those designed by Zucchi are often the coherent expression of a compositional, well-structured work within which it is possible to trace different but always clear and evident narrative structures (Fig. 11).

In the issue of *Area* dedicated to his firm, Cino Zucchi tells, rather amusingly, about the time when Antonio Monestiroli, meeting him, jokingly asked him to disown the design of the Office Building U15 Milanofiori in Assago, refusing to believe that the building could have been designed by the same architect who had designed the Casa alle Zattere in Venice.

The sketch proposed in the dialogue between himself and the Milanese Master is an expression of the different positions that characterise Italian architectural culture. On the one hand there is the one interpreted by Monestiroli, for whom the meaning of architecture is to be sought primarily in its



Fig. 10 | A Building in Castel di Sangro, central Italy (credit: P. Scala).

Fig. 11 | Curtains (credit: Inspiration and Process in Architecture).





Fig. 12, 13 | Casa alle Zattere in Venice, designed by Cino Zucchi (credits: Area 125).

form, an expression of the theme that the architect pursues 'obstinately' throughout his existence and which requires a consistency of 'language'. On the other that of Zucchi who, proposing a comparison between his architecture and Stanley Kubrick's filmography, responds that «[...] between the Headquarters of Salewa / A Clockwork Orange and the Venice House / Barry Lyndon there is no formal kinship, but only an attempt to find the right spaces and figures for each 'circumstance', for each theme, for each specific context: a building-advertising in an alpine landscape or a council house in the fabric of Giudecca» (Casamonti, Tamburelli and Zucchi, 2012, p. 7).

It is through 'variation' that the buildings designed by CZA firm seem to be able to capture the character of places by enhancing their plural dimension. Variation generates an 'appropriate' figure capable of triggering a mechanism of analogical association between the new architecture and the contexts in which it fits. The Milanese architect's elevations are built around this theme, both when they are developed with traditional techniques and when they are dry-assembled, but in the two cases the resulting expressive results are very different.

In the case of the Giudecca (Fig. 12, 13), the eccentric arrangement of some holes, emphasised by the variation in the size and arrangement of the cornices, ends up accentuating the stereometric perception of the building's regular volume. In the case of the Nuvola Lavazza New Headquarters (Fig. 14), Zucchi works instead on the side of dematerialising the building through an elegant façade (Fig. 15) composed of 1,400 modules characterised by 1,200 variations. According to Aimar (2016), great importance has been given to standardisation in this order, referring to the entire production process rather than to the individual components, to which freedom is left in the customisation of the elements; for this order, the multinational Schüco specifically produced 26 different matrices for as many types of profile components of the façade.

Obviously, the value of the Lavazza Complex, both from an urban and architectural point of view, cannot be summarised in the single building or even in the façade alone. However, what is of interest for the purposes of this article is the ability of the designer to take the opportunity to decline, through different technological choices, the common thread of his research.

The 'linguistic incoherence' that characterises Cino Zucchi's architecture is neither a choice nor probably an objective, it is simply the outcome of a process that, as he himself argues, seeks 'figures' capable of building and fitting into contexts, where this term includes not only the pre-existing urban fabrics, but also the intangible contexts of environmental, functional, social and economic choices that are synthesised and summarised in the image of the building. The beautiful sketches (Fig. 16) published in the volume Cino Zucchi – Inspiration and Process in Architecture (Bassoli, 2014) suggest to the viewer the possibility of working within an architectural culture that reasons, with proud lightness, by modules, grids and rhythms, claiming the freedom to break their rules consciously.

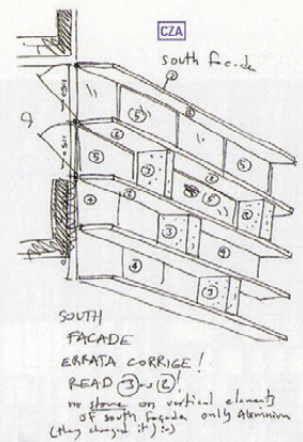
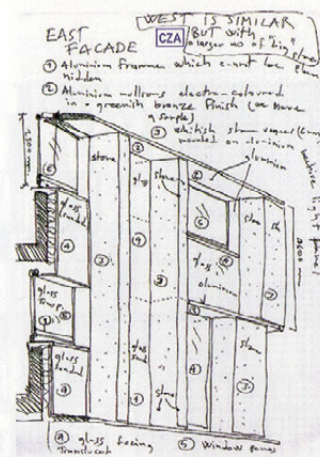
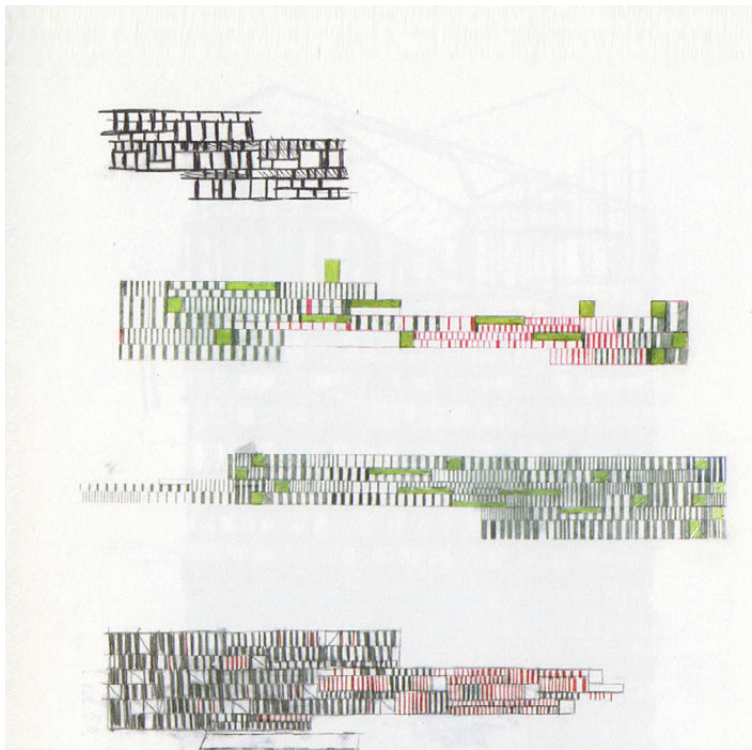
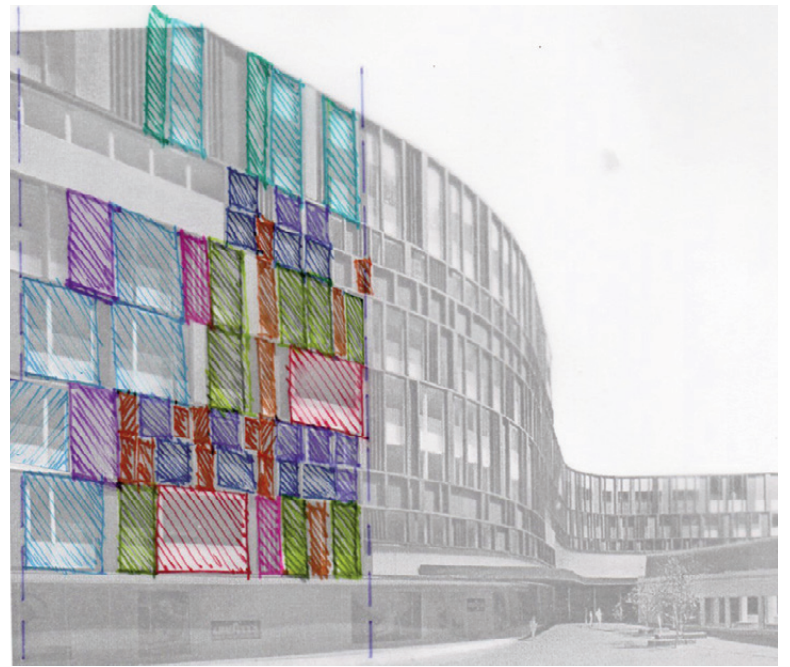
Concluding reflections | Cino Zucchi's design approach is certainly not unique in the contemporary architectural scene, yet in this article it is taken as exemplifying an ability to hybridise different points of view (certainly the outcome of an education proudly claimed to be hybrid) and to interpret the demands posed by contemporaneity without renouncing the coherence of his own research path.

The reflections developed as part of the essay have matured in the context of a typically 'Italian' condition that in recent years has led to a progressive breakdown of architecture into disciplinary sectors and an equally progressive divarication between research and professional practice. This condition has sometimes resulted in a growing indifference to the theoretical aspects that determine the invention of new spatial paradigms and

that materialise in different architectural 'images', often considered only as the linguistic cipher of a specific architect.

The proposed critical reading tries to construct a common, cross-disciplinary territory of architecture using the pre-text (Argan's essay), which, in identifying the dichotomy between object module and measure module, perhaps marked the progressive split between two lines of research: on the one hand, that which investigates the performance dimension of architecture and, on the other, that founded on the idea of the discipline's 'autonomy' which, often, seems to slip over reality.

In this context, it is believed that a reflection may make sense that, starting from the meaning of the concept of module in contemporary times, tries to reason about the different architectural paradigms that define the difference between the concept of 'façade' and 'skin' and to investigate the expressive potential of the prefabricated element understood not only as a technological component to which to entrust the performance of the envelope from the energy and environmental point of view, but also as a 'dynamic' compositional module, capable of constructing and re-signifying urban contexts and creating architecture that does not stand as concluded objects in itself. In such a perspective, a new idea of standard, connected to Industry 4.0, can take shape, one that invests more in production processes than in individual objects, and that allows for combining responses in economic and environmental terms with the reasons for an architectural design capable of stitching together the dichotomy between object module and measure module.



Lavazza Headquarters
 Turin, 2010
 Elevation studies and
 façade details sent by fax

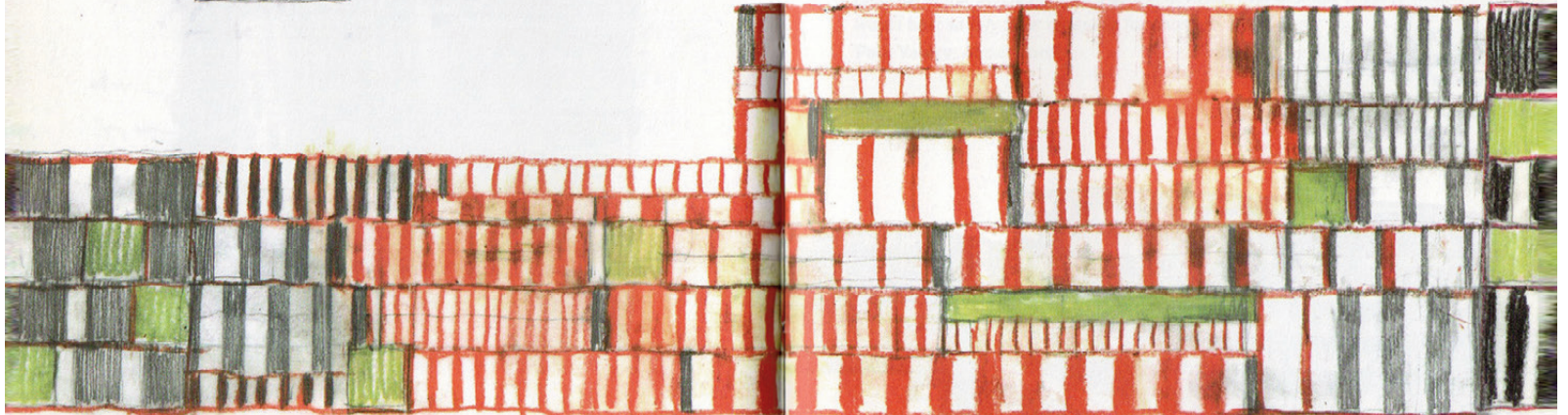


Fig. 14-16 | Lavazza Headquarters in Turin, designed by Cino Zucchi: sketches and analysis of the façade (credits: Area No. 125; Inspiration and Process in Architecture).

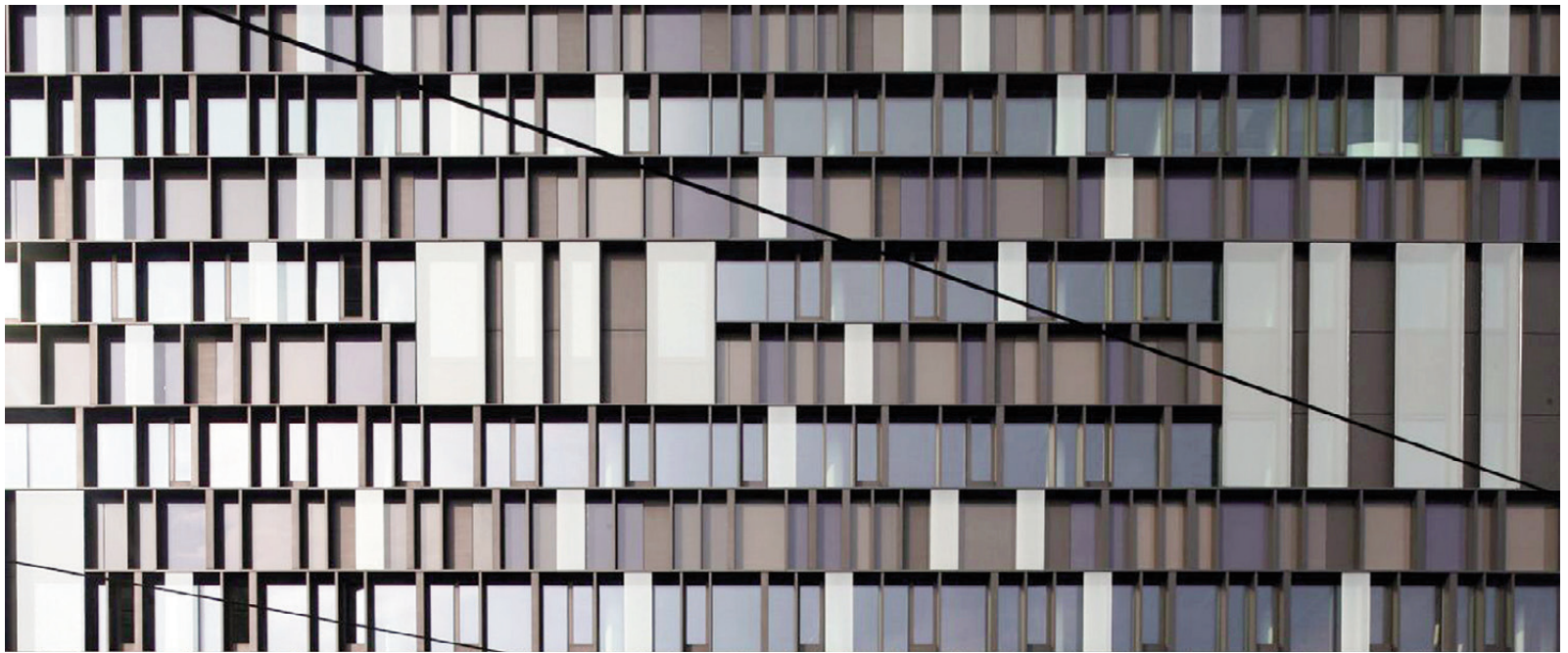


Fig. 17 | Lavazza Headquarters in Turin, designed by Cino Zucchi: the façade (credit: A. Martiradonna; source: zucchiarchitetti.com).

References

- Aimar, F. (2016), “Nuova sede Lavazza a Torino di Cino Zucchi – Le tecnologie”, in *teknoring | Il portale delle professioni tecniche*, 23/02/2016. [Online] Available at: teknoring.com/news/progettazione/nuova-sede-lavazza-a-torino-di-cino-zucchi-le-tecnologie/ [Accessed 9 October 2023].
- Argan, G. C. (1965), *Progetto e Destino*, Il Saggiatore, Milano.
- Bassoli, N. (ed.) (2014), *Cino Zucchi*, Moleskine, Milano.
- Blake, P. (1983), *La forma segue il fiasco – Perché l'architettura moderna non ha funzionato*, Alinea, Firenze.
- Bilò, F. (2014), “Programma e Spazio – Note su un rapporto complesso”, in Ravagnati, C. and Palma R. (eds), *Atlante di Progettazione Architettonica*, Città-Studi, pp. 358-367. [Online] Available at: ricerca.unich.it/retrieve/handle/11564/645888/123999/Programma%20e%20Spazio_Atlanter%20di%20Progettazione.pdf [Accessed 9 October 2023].
- Blundell Jones, P. (1997), *Hans Scharoun*, Phaidon Press, London.
- Capozzi, R. (2010), “L'architettura dell'esattezza – La Neue Nationalgalerie di Mies van der Rohe”, in *Bloom*, n. 7, pp. 28-31. [Online] Available at: academia.edu/7079741/Larchitettura_dellesattezza_La_Neue_Nationalgalerie_di_Mies_van_der_Rohe [Accessed 9 October 2023].
- Casamonti, M., Tamburelli, P. P. and Zucchi, C. (2012), “Sentimental education – A dialogue among Marco Casamonti, Pier Paolo Tamburelli and Cino Zucchi”, in *AREA*, vol. 125, pp. 4-17. [Online] Available at: area-arch.it/sentimental-education-a-dialogue-among-marco-casamontipier-paolo-tamburelli-and-cino-zucchi/ [Accessed 9 October 2023].
- Del Giudice, D. (2012), “Il cambiamento del paradigma in architettura | Data-driven geometry mutation”, in *AREA*, vol. 124, pp. 4-12.
- De Fusco (1978), *Segni, Storia e Progetto dell'Architettura*, Laterza, Bari.
- De Fusco, R. (1974), *Storia dell'Architettura Contemporanea*, Laterza, Roma-Bari.
- Eberhardt, E. (2023), “Mexico City museum features ‘living facade’ made of thousands of aluminium panels”, in *Dezeen*, 17/07/2023. [Online] Available at: dezeen.com/2023/07/17/national-biodiversity-pavilion-mexico-fernando-ahumada [Accessed 9 October 2023].
- Gregotti, V. (1984), “Modificazione”, in *Casabella*, n. 498/499, pp. 2-7.
- Heuser, M. (1998), “Peter Behrens – La finestra sul cortile – Behrens e Mies van der Rohe – AEG-Turbinenhalle, Berlino 1908-1909”, in *Casabella*, n. 651/652, pp. 14-25. [Online] Available at: casabellaweb.eu/wp-content/uploads/2020/09/CB-651-652.pdf [Accessed 9 October 2023].
- Kepes, G. (1966) *Module, Proportion Symmetry, Rhythm*, George Braziller, New York.
- Koolhaas, R. (1989), “I combine Architectural Specificity with Programmatic Instability”, in *Telescope*, n. 3, p. 7.
- Koolhaas, R. (1978), *Delirious New York – A retroactive manifesto for Manhattan*, Oxford University Press, New York.
- Koolhaas, R. and Mau, B. (1995), *S,M,L,XL*, The Monacelli Press, New York.
- Le Corbusier (1924), “Costruire in serie”, in Tamborrini, R. (ed.) (2003), *Le Corbusier – Scritti*, Einaudi, Torino, pp. 87-90.
- MoMA (n.d.), “Ludwig Mies van der Rohe – Friedrichstrasse Skyscraper Project, Berlin-Mitte, Germany (Exterior perspective from north), 1921”, in *moma.org*. [Online] Available at: moma.org/collection/works/787 [Accessed 9 October 2023].
- Petrucchioli, A. (1977), “Nota – Scheda sul Modulo”, in Quaroni, L. (2001), *Progettare un edificio – Otto lezioni di Architettura*, Kappa Editore, Roma, pp. 164-167.
- Pota, G. (2021), *Designing Collective Housing in the Era of Digital Tools – Relations between computational thinking and adaptive dwelling | Progettare la Residenza Collettiva nell'Era degli Strumenti Digitali – Relazioni tra pensiero computazionale e abitazione adattiva*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Architettura, XXXIII ciclo, a.a. 2020-2021, Università degli Studi di Napoli ‘Federico II’. [Online] Available at: fedoa.unina.it/13848/1/Pota_Grazia_33.pdf [Accessed 9 October 2023].
- Prestinzenza Puglisi, L. (2017), “Architetti d'Italia – Cino Zucchi” in *Artribune*, 28/03/2017. [Online] Available at: artribune.com/progettazione/architettura/2017/03/cino-zucchi-italia/ [Accessed 9 October 2023].
- Rossi, A. (1966), *L'Architettura della Città*, Marsilio, Padova.
- Scala, P. (2021), *Fase Rem*, Letteraventidue, Siracusa.
- Zucchi, C. and Bassoli, N. (2014), *Innesti – Il nuovo come metamorfosi | Grafting – The new as metamorphosis*, vol. I, Marsilio, Venezia.

ARTICLE INFO

Received	15 September 2023
Revised	19 October 2023
Accepted	26 October 2023
Published	31 December 2023

ASSEMBLAGGIO E DIS-ASSEMBLAGGIO

Il modulo come elemento compositivo per una ‘nuova’ sostenibilità: il caso spagnolo

ASSEMBLY AND DISASSEMBLY

The module as a compositional element for a ‘new’ sustainability: the Spanish case

Claudia Pirina, Giovanni Comi, Anna Frangipane

ABSTRACT

Il contributo indaga il concetto di modulo a partire dalla duplice definizione proposta da Argan di modulo-misura e modulo-oggetto riflettendo sulla progettazione architettonica per ‘elementi’ in un’ottica di economia circolare. Questa riflessione viene condotta selezionando alcuni casi studio di architetture prefabbricate all’interno del panorama iberico, mettendo a confronto progetti contemporanei con alcune opere dei Maestri del ‘900, secondo un processo a ritroso. Tali opere si offrono come emblematiche, in una logica di interazione e ‘sintesi’ tra tecnologia e progettazione in relazione alle contemporanee sfide mondiali di sostenibilità e transizione energetica. L’indagine sui nuovi modi di intendere e progettare l’architettura introduce il metodo del Design for Disassembly e amplia la riflessione sul riuso dei singoli elementi di cui si compongono gli edifici.

This paper investigates the concept of module based on Argan’s proposed dual definition of module-measure and module-object, reflecting on architectural design by ‘elements’ from a circular economy perspective. This reflection is conducted by selecting case studies on prefabricated architecture within the Iberian context, comparing contemporary projects with selected works by 20th-century Masters, following a reverse process. These works are offered as emblematic, in a logic of interaction and ‘synthesis’ between technology and design in relation to the contemporary global challenges of sustainability and energy transition. The investigation into new ways of understanding and designing architecture introduces the method of Design for Disassembly and extends the reflection on the reuse of buildings to the individual elements they are composed of.

KEYWORDS

assemblaggio, disassemblaggio, prefabbricazione, modulo, Spagna

assembly, disassembly, prefabrication, module, Spain

Claudia Pirina, Architect and PhD, is an Associate Professor of Architectural and Urban Composition at the University of Udine (Italy). She has taught and lectured at Italian and foreign Universities, organized exhibitions and seminars, and participated in workshops. Her research topics are archaeology, the Masters of Spanish architecture, the relationship between architecture and the arts and the landscapes that were the scene of the Great War. E-mail: claudia.pirina@uniud.it

Giovanni Comi, Architect and PhD in Architectural and Urban Composition, is a Researcher at the DPIA of the University of Udine (Italy). His research focuses on architectural composition at different scales, design related to the built environment, and urban and landscape regeneration in marginal and fragile contexts. E-mail: giovanni.comi@uniud.it

Anna Frangipane, PhD, is an Associate Professor of Technical Architecture at the University of Udine (Italy). Her research focuses on materials and techniques of historic construction, the Modern, and sustainability, most recently in relation to the circular economy. E-mail: anna.frangipane@uniud.it



Nel panorama contemporaneo la questione ambientale e i temi della sostenibilità e del risparmio delle risorse rivestono una sempre maggiore centralità che si esprime su due piani reciprocamente interconnessi: da un lato le politiche, gli interventi normativi, le strategie e gli investimenti incentivano in diversi settori produttivi la transizione verso un'economia maggiormente sostenibile; dall'altro – in ambito edilizio – lo sviluppo delle tecniche di prefabbricazione e l'impiego della tecnologia BIM nelle fasi di progetto e cantiere hanno favorito un modo 'alternativo' di pensare l'edificio nei termini sia dell'eco-efficienza che della maggiore versatilità e flessibilità. Negli anni Novanta il settore delle costruzioni era ritenuto responsabile del consumo di circa il 40% delle materie prime e di un terzo dell'energia globale. I dati relativi all'impatto dell'Ambiente costruito sull'Ecosfera¹ (Rees, 1999) mostrano che, due decenni dopo, alla filiera degli edifici è imputabile la produzione di oltre un terzo dei rifiuti e il 40% delle emissioni di diossido di carbonio (Pomponi and Moncaster, 2017).

Questi dati evidenziano come il settore edilizio, che riveste un ruolo cruciale nella costruzione di contesti abitabili e nella realizzazione di infrastrutture per il territorio, eserciti anche la maggior pressione sull'ambiente (Pomponi and Moncaster, 2016): pur occupando solo il 3% della superficie terrestre le città sono, infatti, responsabili di oltre il 70% del consumo di energia (UN, 2023). A tali criticità si aggiunge un tasso di consumo delle materie prime non rinnovabili che supera il tasso di rigenerazione, con conseguenti ripercussioni sulla reperibilità e sui costi dei materiali. Nonostante i Piani strategici e le politiche promosse a livello Europeo (European Commission, 2020a) per il raggiungimento degli Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030 (UN – General Assembly, 2015), i livelli di CO₂ sono in continuo aumento e se ne prevede il raddoppio entro il 2050 (IEA, 2013).

Alla luce dell'attuale crisi energetica si rende pertanto necessario un cambio di visione che affronti le problematiche della sostenibilità oltre la semplice tutela dell'ambiente per spingersi verso una sua rigenerazione (De Leonardis, 2017). Il Green Deal (European Commission, 2019) ha proposto una prima transizione dall'economia lineare a quella circolare rappresentando, infatti, una pianificazione ragionata e orientata, da attuarsi in una prospettiva a medio e lungo periodo (Mazzucato, 2021; Fig. 1). Questa politica mostra, tuttavia, dei limiti: pur incoraggiando l'uso delle fonti rinnovabili e della eco-efficienza edilizia, il paradigma dello 'sviluppo sostenibile' della green economy non interviene sulle modalità produttive come invece si propone di fare, sia pure tra molte difficoltà, il modello del 'futuro sostenibile' della blue economy (Pauli, 2010).

Se la green economy rappresenta una fase di transizione dall'economia lineare a quella circolare, la blue economy ne costituisce il pieno superamento, la sua trasformazione verso un'economia chiusa, 'cradle to cradle'² (McDonough and Braungart, 2002), nella quale 'i rifiuti di qualcuno diventano risorsa per qualcun altro' (Pauli, 2010; Fig. 2). Intervenedo sui meccanismi produttivi, sul risparmio a monte dei materiali – suscettibili di ripetuti riutilizzi – la blue economy rappresenta pertanto una rifondazione della cultura industriale e produttiva, che dal paradigma meccanicistico

del 'mondo come macchina' muove verso quel paradigma ecologico che interpreta il 'mondo come rete' di sistemi interconnessi (Capria and Mattei, 2017).

In questo ampio e complesso quadro culturale, la diffusione di soluzioni modulari si offre come opportunità per un metodo aperto, sistemico e processuale di costruire, non solo favorendo la versatilità e la potenziale riconfigurazione spaziale degli edifici (Open building e Design for Change), ma anche lo smontaggio e il riutilizzo dei loro componenti (Design for Disassembly – DfD). Il testo, attraverso alcune applicazioni della progettazione modulare e della prefabbricazione, approfondisce le conseguenze che questo approccio circolare, 'zero rifiuti', determina non solo sull'ambiente costruito (European Commission, 2020b) ma anche sul modo di pensare la costruzione.

L'articolo si compone di quattro paragrafi: 'Obiettivi e criticità' motiva e illustra l'originalità del contributo nell'interazione tra considerazioni tecnologiche e compositive; 'Il modulo come principio d'ordine sostenibile' presenta una riflessione sul passaggio dall'idea unitaria dell'organismo architettonico al progetto come montaggio di componenti performanti; 'Tra architettura dei Maestri e contemporaneità: il caso spagnolo' declina il concetto di sostenibilità attraverso il tema compositivo dell'assemblaggio e dis-assemblaggio; 'Conclusioni e sviluppi futuri' riflette sull'esigenza e sulla difficoltà di definire un rinnovato statuto identitario dell'architettura alla luce dei processi progettuali e costruttivi contemporanei.

Obiettivi e criticità | Rivolgendosi a progettisti e tecnologi il contributo si pone l'obiettivo di indagare nuovi modi di intendere e progettare l'architettura in relazione alle contemporanee sfide determinate dalla consapevolezza di risorse limitate, di sostenibilità e transizione energetica, interrogandosi sulle modalità con cui la didattica del progetto possa farne un tema compositivo. Il testo si propone di evitare semplificazioni e rimosioni rassicuranti che farebbero della tecnologia un nucleo di conoscenze agganciato all'attualità ma separato dalla elaborazione progettuale, con la conseguenza di trascurare temi centrali dell'architettura contemporanea come quelli della contestualizzazione e del significato da assegnare ai nuovi materiali performanti.

La Composizione Architettonica condivide con la Tecnologia dell'Architettura la stessa consapevolezza della gravità della situazione ambientale ed economica, la tensione per rispondere alla crisi climatica e la scelta dell'economia circolare. Tuttavia – si pensi alle esperienze architettoniche presentate alla Mostra Internazionale di Architettura di Venezia 2018 da Julien Choppin, Nicola Delon e Sébastien Eymard (Fig. 3) – spesso queste tensioni si esprimono in opposizione programmatica a un mondo di specialismi proponendo, in alternativa, l'invenzione di nuovi modi di costruire economicamente ed ecologicamente sobri, ricchi di significato e di immaginazione. D'altra parte, recenti ricerche hanno riscontrato che a fronte di una grande quantità di pubblicazioni scientifiche a livello internazionale sul tema della sostenibilità, della circolarità e della digitalizzazione nel settore delle costruzioni, vi è una «[...] scarsa partecipazione delle discipline dell'Architettura e del Design al corpus della produzione scientifica» (Rigillo, Galluccio

and Paragliola, 2023, p. 248), segnalando una progressiva settorializzazione dei saperi.

L'originalità del contributo risiede quindi nel tentativo di far convergere su questi temi un duplice sguardo, compositivo e tecnologico, creando concrete occasioni di ricerca scientifica secondo pratiche di lavoro comune che vadano oltre il semplicistico dialogo tra saperi. Riferimento costante è il fatto architettonico inteso nella sua complessità, ovvero sintesi di contenuti compositivi e formali (tipologico-spaziali e morfologici), ragioni d'uso (programma funzionale e destinazioni d'uso), componenti costruttive (tecniche e materiali) e controllo ambientale (risorse).

Con l'obiettivo di favorire l'approfondimento di questo confronto, il testo illustra una serie di casi studio ritenuti significativi all'interno del panorama spagnolo moderno e contemporaneo. Attraverso questi riferimenti si intende motivare la tesi per cui l'architettura per essere sostenibile debba recuperare la capacità di 'misurare' il proprio rapporto con il contesto e i caratteri del luogo. Infatti se appare doveroso soffermarsi sull'impatto che tutta la filiera edilizia determina sull'ambiente, è altrettanto importante evitare una 'riduzione' del progetto a un compendio di soluzioni impiegate in una prospettiva tecnologica come unica espressione e 'garanzia' di attualità dell'architettura. I casi considerati vengono proposti in quanto esempi emblematici di come il progetto possa inglobare e trasformare le conoscenze tecnologiche stabilendo una significativa 'sintesi' tra costruzione e architettura.

Il modulo come principio d'ordine sostenibile | Studi e ricerche recenti mostrano che la strategia più comune con cui si interviene su un edificio al termine del suo ciclo di vita è ancora quella del riciclo applicato a materiali e prodotti secondo logiche di 'down-cycling'. Le ragioni sono molteplici, sia intrinseche alla natura stessa degli edifici sia relative alla normativa che premia le pratiche di riciclo rispetto a quelle di riuso. Questo approccio end-of-life di riciclo dei rifiuti tuttavia presenta diverse criticità legate agli elevati costi energetici e alla qualità progressivamente inferiore del prodotto riciclato. In questo quadro si inseriscono le operazioni di decostruzione selettiva che, anche attraverso documenti fondamentali come l'European Union Construction and Demolition Management Protocol (European Commission, 2016) e le Guidelines for the Waste Audits Before Demolition and Renovation Works of Buildings (European Commission, 2018), intervengono allo scopo di migliorare l'identificazione e la logistica dei rifiuti, il loro trattamento e la gestione della loro qualità.

Questo approccio progettuale alternativo non solo è rivolto all'edificio nella sua unità, ma più specificatamente alla progettazione dei singoli elementi tecnici e alla catalogazione dei materiali di cui è composto (Fig. 4): si tratta di un processo che attraverso dispositivi meccanici e tecniche costruttive a secco consente un grado di 'libertà' dei componenti tale da renderli maggiormente 'controllabili' aumentandone il grado di reversibilità.

Mutuato dal design industriale (Design for Manufacturing and Assembly), dal quale recupera alcuni principi e strategie, a partire dal Life Cycle Guidance Manual (Keoleian and Menerey, 1993), il Design for Disassembly (Guy and Ciarimboli, 2007) consente lo sviluppo di un processo ecologica-

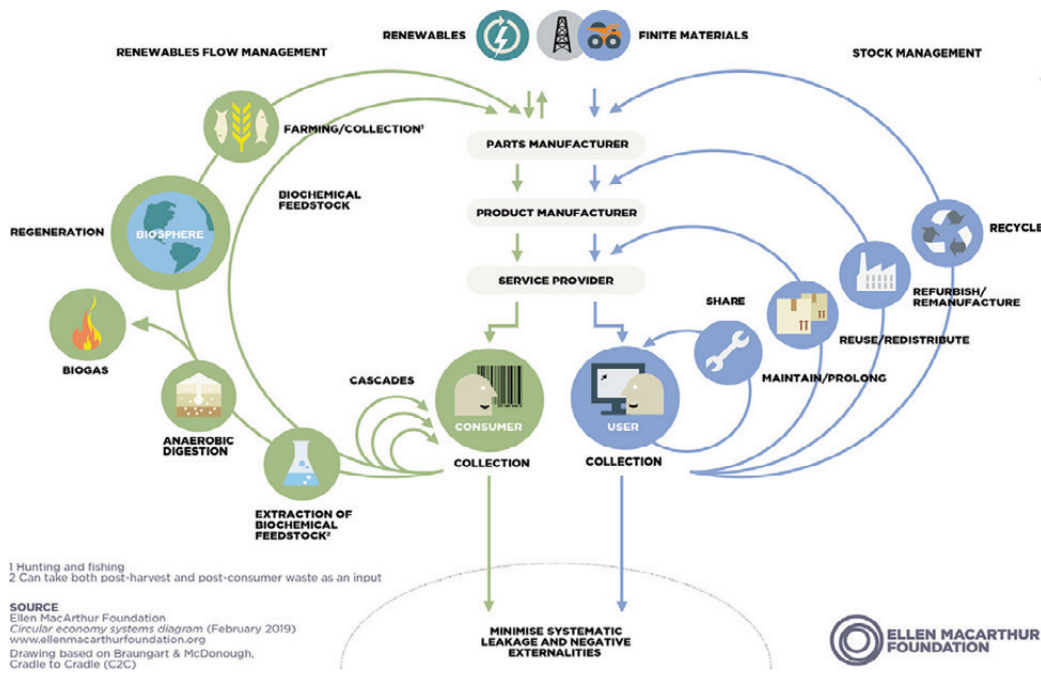


Fig. 1 | Circular Economy Systems diagram, 2019 (credit: Ellen MacArthur Foundation, drawing based on Braungart & McDonough, Cradle to Cradle – C2C).

mente vantaggioso perché, semplificando la separazione dei componenti e dei materiali, ne favorisce il loro recupero e riuso, prevenendo la produzione di rifiuti. Per applicare adeguatamente questo metodo è necessaria, tuttavia, un'approfondita conoscenza e valutazione delle casistiche dei prodotti e dei componenti, affinché nelle operazioni di disassemblaggio se ne preservi l'integrità (Gambato et alii, 2022). È pertanto utile che la progettazione si ispiri a principi di modularità e, per quanto possibile, mono-materialità, introducendo, attraverso la prefabbricazione dei componenti industrializzati, quel principio d'ordine che lega insieme il sistema di moduli-oggetti di cui si compone la costruzione.

L'architettura modulare e le sue possibili applicazioni in una logica di sostenibilità si collocano alla convergenza di molti fattori che già Argan (1965, p. 104) esplicita nel suo lavoro modulo-misura e modulo-oggetto. Infatti, quando scrive che «[...] il fatto che i procedimenti operativi dell'architettura vengano giorno per giorno trasformandosi ed assumendo il carattere di procedimenti industriali, e che si traccino programmi per l'industrializzazione totale della produzione edilizia, non giustifica, in linea di principio, alcun timore circa la possibilità di raggiungere, attraverso questi nuovi processi, risultati di valore artistico» è perché riconosce nell'uso del modulo una matrice che vincola la composizione architettonica senza limitarla completamente. La modularità, anzi, offre una coerenza costruttiva a tutte le parti del sistema con il risultato di un rapporto consapevole tra progetto di architettura e tecnica costruttiva (Fig. 5).

Il modulo viene così inteso nella sua duplice definizione di «principio metrico [...] che mira ad assicurare un'armonia di effetti visivi» (Argan, 1965, p. 109) e di fatto-base della costruzione, identificabile con quella produzione in serie di elementi, tra cui stabilire sistemi di relazioni a scale differenti. La riflessione sull'architettura come composizione modulare viene quindi condotta secondo una prospettiva che richiede un necessario cambio di

senso nel progetto di un edificio in rapporto al suo ciclo di vita e costituisce un'opportunità per riflettere sull'ineludibile questione di come le nuove tecniche si rapportino con il progetto di architettura.

Tra architettura dei Maestri e contemporaneità: il caso spagnolo | Condividendo con l'accademico, ambientalista e divulgatore scientifico canadese David Takayoshi Suzuki l'idea che «[...] the way we see the world shapes the way we treat it»³, appare utile e interessante rileggere alcune esperienze architettoniche, più o meno recenti, alla luce di una rinnovata contemporanea visione del mondo, a partire dal concetto di sostenibilità inteso in senso allargato.

Il tema dell'assemblaggio e dis-assemblaggio in architettura sottende il considerare l'edificio come struttura in costante evoluzione, caratterizzata da flessibilità e reversibilità spaziali, funzionali, strutturali e materiali. Tali requisiti hanno caratterizzato la costruzione di numerosi edifici fin dall'antichità⁴ e, in tempi più recenti, di edifici 'a secco', edifici prefabbricati o temporanei, senza che l'attributo della sostenibilità costituisse necessariamente obiettivo primario dell'intervento. A causa dell'esponenziale crescita di fenomeni legati ai cambiamenti climatici le recenti e future sfide, alle quali come architetti siamo chiamati a tentare di fornire proposte e risposte, impongono un cambio di prospettiva che, nonostante venga spesso interpretato e descritto come la necessità di modifica radicale di modi e tecniche, può e deve invece essere inteso come evoluzione di dispositivi e procedimenti preesistenti, eventualmente modificati e integrati al fine di adeguarli alle nuove istanze.

Le strategie compositive di assemblaggio e dis-assemblaggio acquisiscono maggior interesse se applicate a edifici preesistenti grazie alla possibilità di garantire la preservazione attraverso operazioni di trasformazione che possono prevedere la sovrapposizione, la giustapposizione, l'inserimento del nuovo in rapporto a fabbriche esistenti (Russo, 2021) che, a loro volta possono essere man-

tenute e/o riqualificate anche attraverso operazioni di demolizione parziale o selettiva. In tal senso queste strategie consentono di aprire prospettive di riusi adattivi di quell'immenso patrimonio edilizio, spesso in obsolescenza e/o disuso che caratterizza Paesi come il nostro, oltre che molte nazioni europee.

Il caso spagnolo viene utilizzato a pretesto di questa ipotesi e indagine, provando a rintracciare affinità e divergenze tra il lavoro di alcuni Maestri e una serie di proposte e interventi più recenti sul nuovo e sull'antico. Le opere presentate non intendono proporsi come esaustive di un dibattito complesso e articolato, ma pongono al centro la composizione intesa come primo atto progettuale che, nella sua ideazione, unisce inscindibilmente immagine architettonica con soluzioni strutturali, tecniche e tecnologiche. I progetti selezionati utilizzano inoltre figure 'semplici'⁵, e un numero limitato di materiali – non necessariamente di ultima ideazione o innovativi – stimolando a interrogarci criticamente sul significato della parola 'sostenibilità'.

Nell'occuparci di architettura modulare e sue possibili applicazioni, il lavoro di alcuni Maestri spagnoli ha efficacemente indagato la duplice definizione di Argan lavorando sul tema della prefabbricazione. Tra i numerosi esempi che si potrebbero citare, il lavoro di ricerca di Miguel Fisac (1967, p. 9) rappresenta una tappa fondamentale nel quadro dell'architettura spagnola. Le sue opere indagano infatti le possibilità di quel «[...] material pastoso que se echa en moldes» che è il calcestruzzo armato utilizzato per forme strutturali, ma anche per la realizzazione di elementi di rivestimento o tamponamento esterni. Fisac dedicherà quasi l'intera carriera al progetto di una serie di elementi modulari prefabbricati – poi brevettati – che utilizzerà per la composizione di edifici attraverso ripetitive, ma spazialmente innovative, operazioni di assemblaggio.

Nel Laboratorio modelli del Centro di Studi Idrografici (Fig. 6), per esempio, il ritmato utilizzo delle 'travi osso' (Arqués Soler, 1996; González Blanco, 2010; Fig. 7) modella lo spazio in stretto rapporto con il ritmo della luce introdotta zenitalmente grazie all'asimmetrica composizione della sezione delle travi. Nella Chiesa di Santa Ana, invece, le potenzialità espressive degli elementi prefabbricati sono sperimentate in relazione all'andamento di forme concave e convesse, sempre amplificate del rapporto con la luce (Figg. 8, 9). Nelle sue opere un unico materiale è utilizzato per la definizione di spazi che aspirano a coniugare l'utile, il tecnicamente possibile con il bello (Castro, 1971). Attenzione particolare è sempre rivolta ai giunti che tuttavia nel tempo si sono dimostrati gli elementi maggiormente deboli delle strutture, al punto da rendere necessario, in taluni casi, lo smontaggio e rimontaggio degli elementi strutturali. Il sistema utilizzato per i giunti, nella nostra generale riflessione, costituisce motivo di particolare attenzione perché può essere inteso come quell'elemento progettuale capace di rendere più o meno possibile e/o agevole lo smontaggio e riutilizzo delle strutture lungo il ciclo di vita dell'edificio.

Il lavoro realizzato da Fisac è stato generalmente rivolto al progetto di edifici ex novo, tuttavia, in tempi recenti, in Spagna è possibile individuare alcuni interventi che, recuperando la tradizione dell'opera di Fisac, si occupano di interve-

nire su strutture preesistenti al fine di riconvertirle nella funzione e di riutilizzarle.

Seppur nelle differenze, alcuni interventi di Ensamble Studio possono essere letti secondo questa logica. Nella Casa del Lettore⁶, sviluppata dalla Fondazione Germán Sánchez Ruipérez e completata nel 2012 all'interno del Matadero Madrid (Fig. 10), una serie di travi prefabbricate a U, di 23 metri di lunghezza, sono utilizzate come unico elemento per la definizione del progetto. Attraversando lo spazio basilicale degli edifici industriali gemelli preesistenti, le travi risolvono spazialmente il rapporto tra piano inferiore e superiore: senza l'introduzione di sostegni intermedi, tali elementi prefabbricati si inseriscono all'interno delle antiche strutture, richiamando la forma delle pensiline esterne che collegano una serie di manufatti presenti all'interno del complesso dell'ex mattatoio (Fig. 11). L'idea potente, nella realizzazione finale, è affiancata dall'introduzione di una serie di elementi metallici o di giunti che conferiscono all'insieme un'immagine che tende alla ricerca di omogeneità e assonanze tra manufatto esistente e progetto del nuovo, più che alla messa in evidenza delle differenze.

La costruzione di rapporti dialettici tra antico e nuovo caratterizza anche altri interventi all'interno delle strutture dell'ex mattatoio. L'architetto Arturo Franco Díaz, insieme con Fabrice Van Teslaar, nella Nave 17 affidata all'Istituzione denominata Intermediae (Pastorelli, 2011; Fig. 12), spe-

rimenta l'introduzione di interventi minimi e totalmente autonomi strutturalmente, che mettono in evidenza il processo di decostruzione e costruzione. L'edificio esistente mantiene tutte le tracce del tempo – quasi in forma di rovina – componendosi con nuovi elementi metallici, impianti a vista e serramenti che definiscono e racchiudono una serie (limitata) di spazi climatizzati. In un costante dialogo tra antico e nuovo, due linguaggi differenti manifestano due posture fronte a fronte. Anche i sistemi vetrati di protezione esterni sono progettati nell'intento di costruire una distanza tra l'antica struttura e l'opera contemporanea, fino a produrre un inusuale rapporto tra architettura e natura (Fig. 13). Nell'intero progetto il giunto assume ruolo primario perché elemento capace di separare, e contemporaneamente unire, distinti mondi.

Nella Nave 8 lo stesso Arturo Franco Díaz interviene in un piccolo edificio amministrativo che necessitava prevalentemente del ripristino della copertura, di un rinforzo strutturale e dell'inserimento di sistemi di condizionamento (Franco and Van Teslaar, 2014). Sebbene in questo caso si tratti di un intervento non 'a secco', l'Architetto individua nuove opportunità per il progetto nelle montagne di macerie derivate dagli interventi sugli edifici adiacenti. L'intero spazio è perimetrato da alte pareti realizzate con la sovrapposizione di tegole piane in forma di 'gelosie' che producono una vibrazione definendo un sistema costruttivo semplice (Figg. 14, 15). Un 'semplice' materiale della tradizione da

scarto si trasforma non solamente in risorsa per il progetto, ma addirittura in unico elemento capace di definire e modulare l'intero spazio. Nell'intelligente modo d'uso di un materiale, incrociato con un'antica tecnica costruttiva, risiede l'interesse di questo piccolo progetto.

Nonostante tali interventi non siano stati progettati secondo le norme e logiche del Design for Disassembly, le strategie progettuali utilizzate rendono più o meno facilmente applicabile lo smontaggio delle nuove strutture. Il passo potrebbe allora essere facilmente colmato introducendo e implementando, nelle fasi iniziali del progetto, un'ulteriore variabile che incorpori l'idea di futuro per tali strutture, pianificandone lo smontaggio, valutando la scelta dei materiali, studiando nel dettaglio gli elementi della composizione e i giunti di connessione. Tali operazioni possono pertanto essere intese come elemento 'aggiunto' a modi, strategie, tecniche e materiali già ampiamente utilizzati e sperimentati, recuperando parallelamente quelle regole del buon costruire affinate dell'architettura 'vernacolare' in funzione del luogo e delle specifiche caratteristiche climatiche in cui l'edificio si inserisce.

Conclusioni e sviluppi futuri | Dalle diverse esperienze presentate emerge la possibilità di tenere insieme nei processi progettuali e costruttivi contemporanei gli esiti della ricerca scientifica e tecnologica con lo statuto identitario dell'architettura.

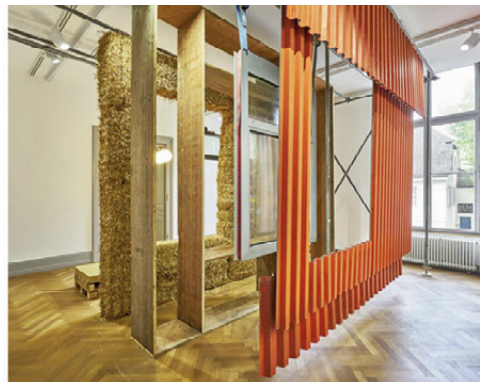
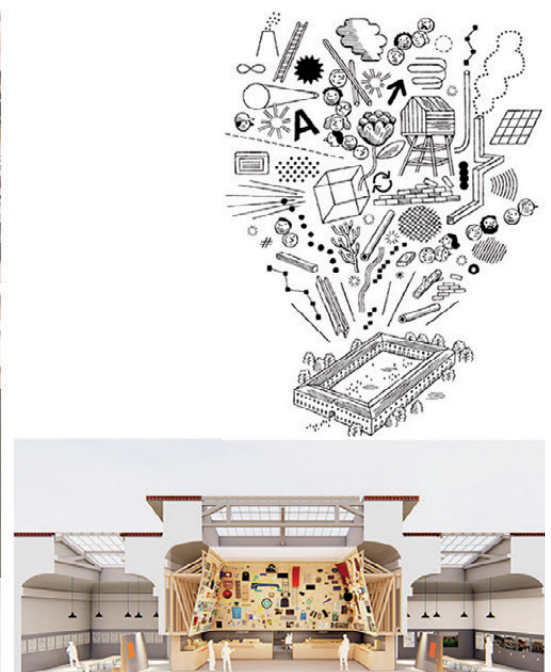


Fig. 2 | K118 – Kopfbau Halle 118 (2021) in Winterthur, designed by baubüro in situ: The corrugated sheet metal cladding system, disassembly from a construction site on the outskirts of Winterthur; Its reuse within the project (credits: Martin Zeller).

Fig. 3 | Lieux Infinis – Pavillon français, designed by Encore Hereux (Nicole Delon, Julien Choppin, Sébastien Eynard), at the International Architecture Exhibition – La Biennale di Venezia, 2018 (credits: Encore Hereux, J. Gerner).



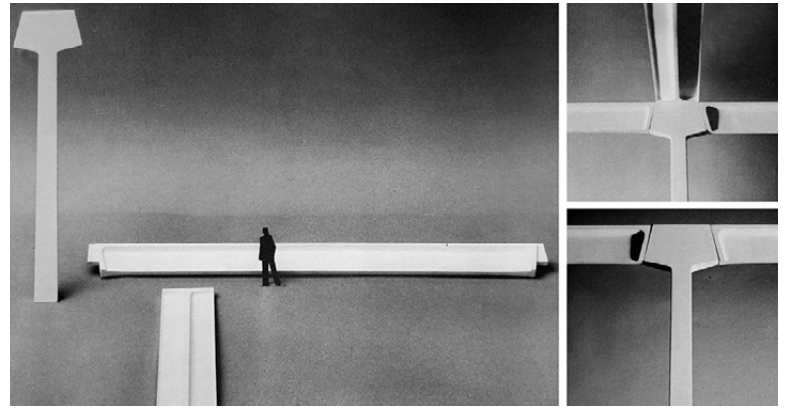
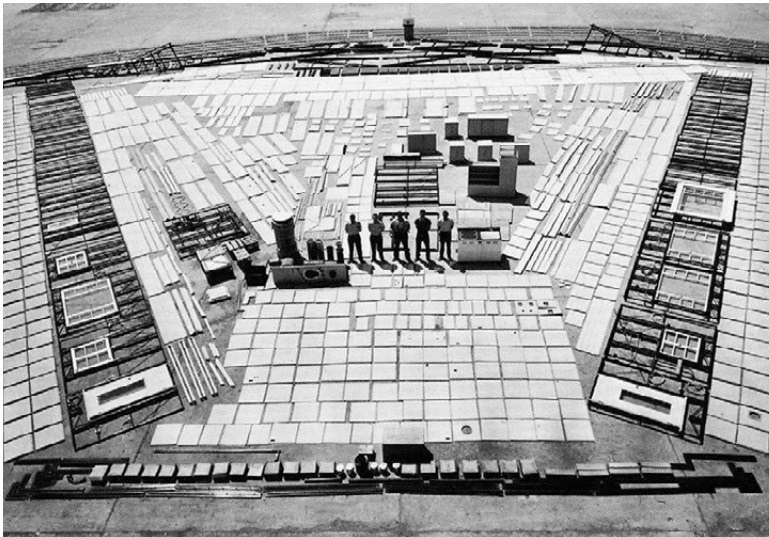


Fig. 4 | Lustron prefabricated house (1949) in Columbus, Ohio: aerial photo of its 3,000 pieces (credit: A. Newman).

Fig. 5 | Elmag factory (1963-1966) in Lissone, designed by Angelo Mangiarotti: system elements assembled in simple support (credits: G. Casali, TFAM, Milan).

Lo sguardo sull'edificato e la progettazione dell'edificabile, come dicono i casi spagnoli, non può prescindere dalla riflessione sul ciclo vitale degli edifici, sulla loro trasformabilità, riparabilità e disassemblabilità, purché questa aumentata competenza a 'sostenere' i processi costruttivi non si coaguli come un sapere che da specifico rischierebbe di diventare settoriale.

L'architettura modulare, il DfD e l'Urban Mining rappresentano discipline che offrono al progetto molte opportunità relative alla flessibilità degli edifici e alla versatilità nell'uso di materiali tali per cui l'attenzione dal prodotto si sposta al 'processo' bidirezionale. Si tratta di pratiche infatti che, se accompagnate dal rispetto di alcuni procedimenti, possono ridurre i costi di costruzione del 30-60 % (Ellen MacArthur Foundation, 2015) e favorire una maggiore adattabilità tipologica degli spazi per edifici, in particolare per edifici del settore terziario soggetti a frequenti rinnovi del fit-out (Talamo et alii, 2021).

Nonostante il crescente interesse verso queste strategie vi sono questioni organizzative e tecniche che ne rallentano la diffusione: la principale difficoltà è rappresentata dalla qualità prestazionale dei prodotti esito di processi di smontaggio, da reimmettere nelle filiere di riuso. In questo senso svolgono un ruolo centrale i procedimenti – già indicati dal progetto Building As Material Banks (Peters et alii, 2017) tra cui il Reversible Building Design e il Building Passport – che consentono di «[...] ricostruire la 'vita' pregressa degli elementi e poterne valutare il possibile inserimento nel modello digitale di un progetto futuro» (Viscuso, 2021, p. 273). Gli edifici sono così assimilabili a delle 'banche' di componenti che possono essere rimessi in circolo senza che ne venga modificata la funzione oppure attraverso operazioni totali o parziali di trasformazione. L'adozione di queste piattaforme digitali⁷ nate nell'ultimo decennio in Europa (Crippa and alii, 2022) tuttavia, conduce a una costruzione 'corretta' solo se l'insieme e ogni parte risulta riferita alla medesima concezione logico-costruttiva (Mangiarotti, 2000).

In ambito mediterraneo e in modo ancora più evidente in Italia (Baiani and Altamura, 2019), le metodologie di DfD e di decostruzione selettiva non hanno ancora assunto i caratteri di una filiera 'altra' rispetto alle modalità di costruzione lineare per la presenza di numerose resistenze di carat-

tere culturale e ambientale. Infatti nonostante il DM 11/10/2017 preveda per gli appalti pubblici che almeno il 50% dei componenti edilizi sia sottoponibile, a fine vita, a demolizione selettiva o a essere riciclabile o riutilizzabile, questa disposizione non ha finora rappresentato un 'driver' per le costruzioni non normate (Sposito and Scalisi, 2020).

Per tutte queste ragioni è opportuno riflettere sulle nuove competenze che sono richieste all'Architetto, a fronte di un inedito approccio al progetto, competenze non solo riferite a una conoscenza accurata dei materiali, ma all'acquisizione di una reale consapevolezza del margine di libertà compositiva per interpretare, vagliare e scegliere in modo appropriato ciò che è necessario alla costruzione in una prospettiva di edilizia circolare. Nel passaggio che avviene tra i saperi della Tecnologia e dell'Architettura il progetto come raccolta di componenti si fa 'catalogo di inventiva', modo inedito di guardare all'opera nella sua totalità e per parti, a ciascuna delle quali restituire un valore di senso e un valore di progetto.

In the contemporary landscape, sustainability and resource-saving are increasingly central themes related to environmental matters. This is expressed on two mutually interconnected planes: on the one hand, policies, regulatory interventions, strategies and investments incentivise the transition to a more sustainable economy in various productive sectors; on the other hand – in the building sector – the development of prefabrication techniques and the use of BIM technology in the design and construction phases have fostered an 'alternative' way of thinking about building in terms of both eco-efficiency and greater versatility and flexibility. In the 1990s, the construction sector was believed to be responsible for consuming about 40% of raw materials and one-third of global energy. Data on the impact of the Built Environment on the Eco-sphere¹ (Rees, 1999) show that, two decades later, the building supply chain is responsible for the production of more than one-third of global waste and 40% of carbon dioxide emissions (Pomponi and Moncaster, 2017).

The data highlights how the building sector, which plays a crucial role in the construction of habitable contexts and the provision of land in-

frastructure, also exerts the most significant pressure on the environment (Pomponi and Moncaster, 2016): despite occupying only 3% of the Earth's surface, cities are, in fact, responsible for more than 70% of energy consumption (UN, 2023). These critical issues are compounded by a consumption rate of non-renewable raw materials that exceeds the remanufacturing rate, affecting material cost and availability. Despite the strategic plans and policies promoted at the European level (European Commission, 2020a) to achieve the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda (UN – General Assembly, 2015), CO₂ levels are continuously increasing and are expected to double by 2050 (IEA, 2013).

Therefore, in light of the current energy crisis, a vision change is necessary to address sustainability issues beyond the simple protection of the environment and to push towards its regeneration (De Leonardi, 2017). The Green Deal (European Commission, 2019) proposed an initial transition from a linear to circular economy representing a reasoned and oriented planning to be implemented in a medium and long-term perspective (Mazzucato, 2021; Fig. 1). However, this policy presents limitations: although the 'sustainable development' paradigm of the green economy encourages the use of renewable energy sources and building eco-efficiency, it does not intervene in production modes as the 'sustainable development' model of the blue economy proposes to do, albeit amid many difficulties (Pauli, 2010).

If the green economy represents a phase of transition from the linear to the circular economy, the blue economy constitutes its full outgrowth, its transformation to a closed, 'cradle to cradle'² economy (McDonough and Braungart, 2002), in which someone's waste becomes a resource for someone else (Pauli, 2010; Fig. 2). By intervening on production mechanisms, on the upstream saving of materials – susceptible to repeated reuse – the blue economy, therefore, represents a refounding of industrial and productive culture, which from the mechanistic paradigm of the 'world as a machine' moves toward the ecological paradigm that interprets the 'world as a network' of interconnected systems (Capria and Mattei, 2017).

Within this broad and complex cultural framework, the dissemination of modular solutions presents itself as an opportunity for an open, sys-

temic and process-oriented method of building, fostering not only the versatility and potential spatial reconfiguration of buildings (Open Building and Design for Change) but also the disassembly and reuse of their components (Design for Disassembly – DfD). Through some applications of modular design and prefabrication, this paper explores the consequences that this circular, ‘zero waste’ approach determines not only on the built environment (European Commission, 2020b) but also on the way we think about construction.

The article consists of four paragraphs: ‘Objectives and critical issues’ motivates and illustrates the originality of the contribution in the interaction between technological and compositional considerations; ‘The module as a sustainable principle of order’ presents a reflection on the transition from the unitary idea of the architectural organism to the project as the assembly of performing components; ‘Between architecture of the Masters and contemporaneity: the Spanish case’ declines the concept of sustainability through the compositional theme of assembly and disassembly; ‘Conclusions and future developments’ reflects on the need and difficulty of defining a renewed identity status of architecture in the light of contemporary design and construction processes.

Objectives and critical issues | The contribution, addressing architects and technologists, aims to investigate new ways of understanding and designing architecture in relation to contemporary challenges determined by awareness of limited resources, sustainability and energy transition, while also investigating how project didactics can embrace it as a compositional theme. The paper aims to avoid simplifications and reassuring removals that would make technology a core of knowledge linked to current events but separated from project elaboration, with the consequence of neglecting central issues in contemporary architecture such as those of contextualisation and of the meaning to be assigned to new performance materials.

Architectural Composition and Building Technology share the same awareness of the severity of the environmental and economic situation, the tension in responding to the climate crisis and the choice of a circular economy. However – considering the architectural experiences presented at the 2018 Venice International Architecture Exhibition by Julien Choppin, Nicola Delon and Sébastien Eymard (Fig. 3) – often these tensions are expressed in programmatic opposition to a world of specialisms by proposing, as an alternative, the invention of new ways of building that are economically and ecologically sober, rich in meaning and imagination. On the other hand, recent research has found that, despite a large number of scientific publications at the international level on the topic of sustainability, circularity and digitisation in the construction sector, there is low participation of the disciplines of Architecture and Design in the body of scientific production (Rigillo, Galluccio and Paragliola, 2023), signalling a progressive sectorisation of knowledge.

Therefore, the originality of the contribution lies in the attempt to bring together a dual perspective on these issues, compositional and technological, creating concrete opportunities for scientific research according to common working practices

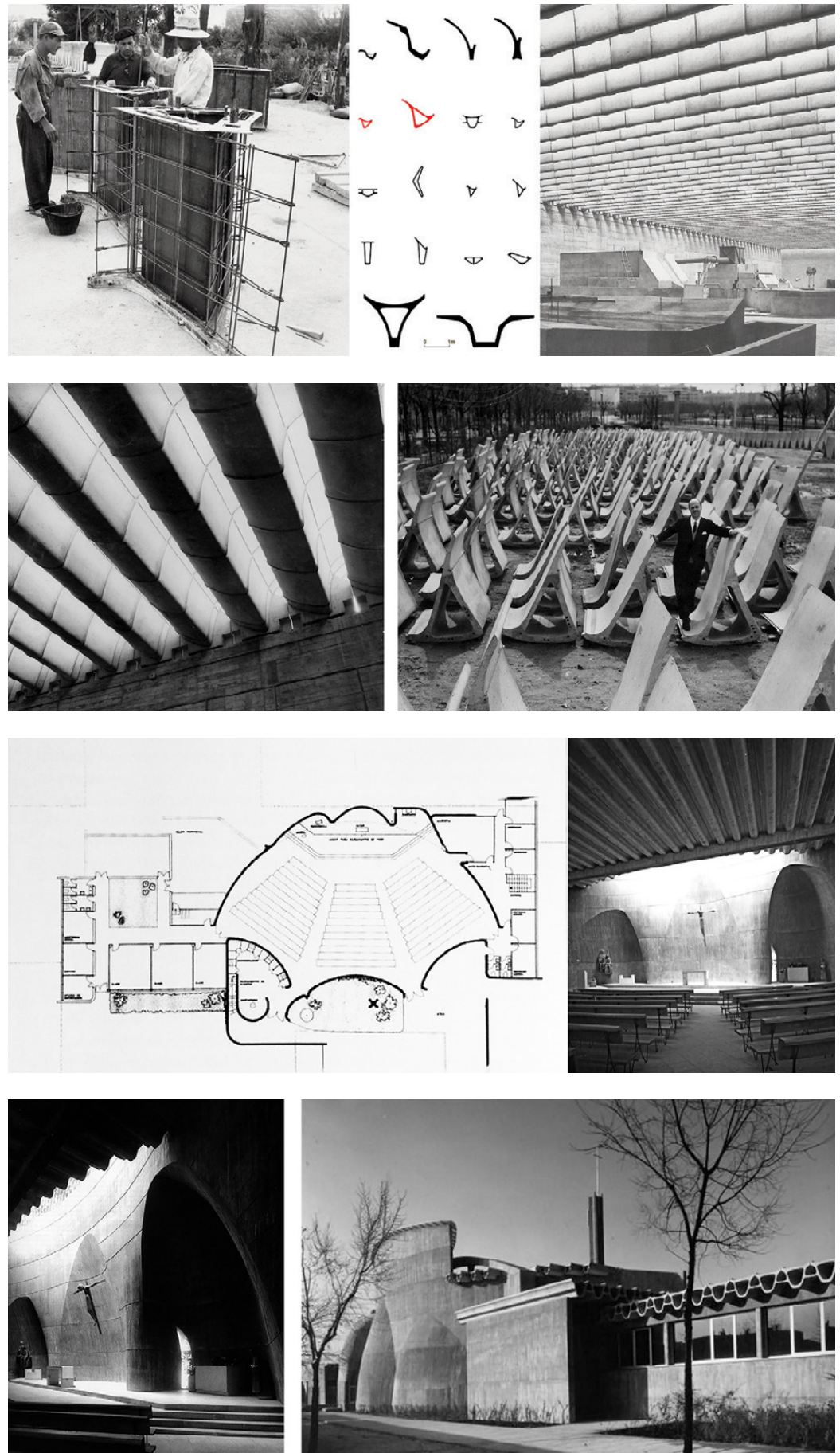


Fig. 6 | Center for Hydrographic Studies (1960) in Madrid, designed by Miguel Fisac: View of the formwork of the beam module; Interior photo of the model workshop; Drawings of the sections of the ‘bone’ beams. The beams used in the Center for Hydrographic Studies are shown in red (credits: Centro de Estudios Hidrográficos; section redesign by C. Pirina).

Fig. 7 | Center for Hydrographic Studies (1960) in Madrid, designed by Miguel Fisac: views of the beams and their modules (credits: Centro de Estudios Hidrográficos).

Figs. 8, 9 | Church of Santa Ana (1965) in Moratalaz, designed by Miguel Fisac: Plan and interior of the nave; View of the interior and exterior of the apse (credits: Fundación Fisac).

that go beyond a simplistic dialogue between different fields of knowledge. A constant reference is the architectural fact understood in its complexity, that is, a synthesis of compositional and formal content (typological-spatial and morphological), reasons for use (functional program and intended uses), construction components (techniques and materials), and environmental control (resources).

To encourage further exploration of this comparison, the text illustrates a series of case studies deemed significant within the modern and contemporary Spanish context. Through these references, the intention is to substantiate the thesis that in order to be sustainable, architecture must recover the ability to 'measure' its relationship with the context and characteristics of the place. While it seems necessary to focus on the impact that the entire building supply chain determines on the environment, it is equally important to avoid a 'reduction' of the project to a compendium of solutions employed in a technological perspective as the only expression and 'guarantee' of architectural relevance. The cases under consideration are emblematic examples of how the design project can incorporate and transform technological knowledge by establishing a meaningful 'synthesis' between construction and architecture.

The module as a sustainable principle of order |

Recent studies and research show that the most common strategy to intervene on a building at end-of-life is that recycling applies to materials and products according to 'down-cycling' logic. There are several reasons for this, both intrinsic to the nature of buildings and related to regulations that reward recycling over reuse practices. However, this end-

of-life approach to waste recycling presents several critical issues related to high energy costs and progressively lower recycled product quality. This framework includes selective deconstruction operations, which, in part through key documents such as the European Union Construction and Demolition Management Protocol (European Commission, 2016) and the Guidelines for the Waste Audits Before Demolition and Renovation Works of Buildings (European Commission, 2018), take action to improve the identification and logistics of waste, its treatment, and its quality management. This alternative design approach is not only aimed at the building in its unity, but more specifically at the design of the individual technical elements and the cataloguing of the materials of which it is composed (Fig. 4): it is a process that, through mechanical devices and dry construction techniques, allows a degree of 'freedom' of the components, such as to make them more 'controllable' by increasing the degree of reversibility.

Borrowed from industrial design (Design for Manufacturing and Assembly), from which it retrieves some principles and strategies, starting with the Life Cycle Guidance Manual (Keoleian and Menerey, 1993), Design for Disassembly (Guy and Ciarimboli, 2007) enables the development of an ecologically beneficial process since it supports the recovery and reuse of components and materials by simplifying their separation, preventing the production of waste. The proper application of this method, however, requires a thorough knowledge and evaluation of the case histories of products and components to ensure their integrity is preserved in disassembly operations (Gambato et alii, 2022). Therefore, it is useful for the design to be inspired by principles of modularity and,

as far as possible mono-materiality, introducing, through the prefabrication of industrialised components, that principle of order that binds together the system of module-objects of which the construction is composed.

Modular architecture and its possible applications in a logic of sustainability stand at the convergence of many factors that Argan (1965) explicitly articulates in his work on module-measure and module-object. When he writes that concerns regarding the possibility of achieving, through these new processes, results of artistic value are not justified by the fact that the operational procedures of architecture are being transformed on a daily basis, taking on the character of industrial procedures, and that programs for the total industrialisation of building production are being devised, it is because he recognises in the use of the module a matrix that constrains architectural composition without limiting it completely. Modularity, on the contrary, determines a constructive coherence to all system parts, resulting in a conscious relationship between architectural design and construction technique (Fig. 5).

The module is thus understood in its dual definition, as a metric principle which aims to ensure harmony of visual effects (Argan, 1965) and as a fact-basis of construction, identifiable with that serial production of elements, between which to establish systems of relations at different scales. Reflection on architecture as a modular composition is thus conducted from a perspective that requires a necessary change of meaning in the design of a building in relation to its life cycle and provides an opportunity to reflect on the unavoidable question of how new techniques relate to architectural design.

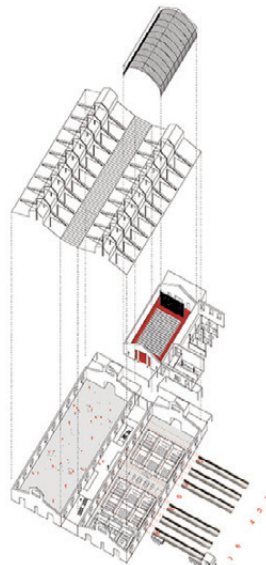
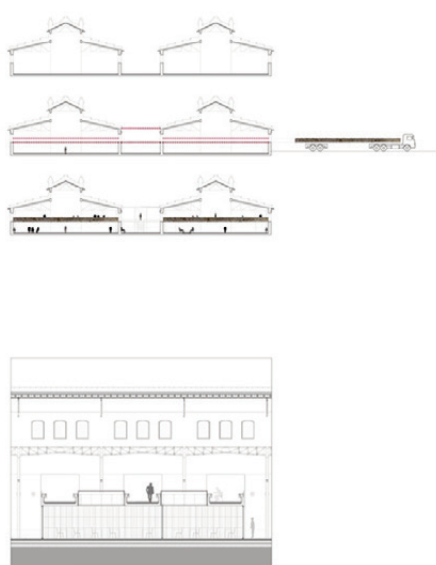


Fig. 10 | Casa del Lector (2012) in Madrid, designed by Ensamble Studio: sections and axonometric cutaway of the project (credits: Ensamble Studio).

Fig. 11 | Casa del Lector (2012) in Madrid, designed by Ensamble Studio: Exterior view of the completed intervention; Photos of the construction site and the installation of the prefabricated beams (credits: Ensamble Studio).

Next page

Fig. 12 | Nave 17 Matadero (2006) in Madrid, designed by Arturo Franco Díaz with Fabrice Van Teslaar: Entrance view from Paseo de la Chopera; Project section (credits: A. Franco Díaz and C. Fernández Pinar).

Fig. 13 | Nave 17 Matadero (2006) in Madrid, designed by Arturo Franco Díaz with Fabrice Van Teslaar: Access system from the outside; Images of interior interventions in relation to traces of the ancient artefact (credits: C. Fernández Pinar).

Fig. 14 | Nave 8B Matadero (2009) in Madrid, designed by Arturo Franco Díaz: Axonometric scheme of the intervention; Detail of the flat tile masonry (credits: A. Franco Díaz and C. Fernández Pinar).

Fig. 15 | Nave 8B Matadero (2009) in Madrid, designed by Arturo Franco Díaz: views of the intervention (credits: C. Fernández Pinar).



Between architecture of the Masters and contemporaneity: the Spanish case | In agreeing with the Canadian academic, environmentalist and scientific populariser David Takayoshi Suzuki with the idea that «[...] the way we see the world shapes the way we treat it»³, it is useful and interesting to reread specific architectural experiences, more or less recent, in the light of a renewed contemporary worldview, starting from the concept of sustainability understood in a broad sense.

The theme of assembly and disassembly in architecture implies considering the building a constantly evolving structure, characterised by spatial, functional, structural and material flexibility and reversibility. These requirements have characterised the construction of numerous buildings since ancient times⁴ and, in more recent times, 'dry', prefabricated or temporary structures, not necessarily setting the attribute of sustainability as the primary objective of the intervention. Due to the exponential growth of phenomena related to climate change, the recent and future challenges we as architects are called upon to try to provide proposals and answers impose a change of perspective that, although often interpreted and described as the need for radical change in methods and techniques, can and should instead be understood as the evolution of pre-existing devices and procedures, possibly modified and integrated to adapt to new demands.

Compositional strategies for assembly and disassembly become even more interesting if they are also applied to pre-existing buildings, due to the possibility of ensuring their preservation through transformation operations that can involve the superimposition, juxtaposition, and insertion of the new in relation to existing factories (Russo, 2021) which, in turn, can also be maintained and/or upgraded through partial or selective demolition operations. In this sense, these strategies open up prospects for adaptive reuses of the immense, often obsolescent and/or disused building stock that characterises countries like Italy, as well as many European nations.

The Spanish case is used as a pretext for this hypothesis and investigation, attempting to trace affinities and divergences between the work of selected Masters and several more recent proposals and interventions on the new and the ancient. The presented works do not intend to introduce themselves as an exhaustive overview of a complex and articulated debate, but they do focus on composition understood as the first act of a project that, in its conception, inseparably combines architectural image with structural, technical and technological solutions. The selected projects also use 'simple' figures⁵, and a limited number of materials – not necessarily innovative or featuring the latest design – prompting a critical questioning of the meaning of the word 'sustainability'.

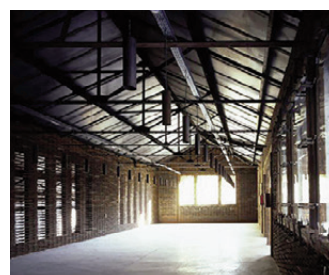
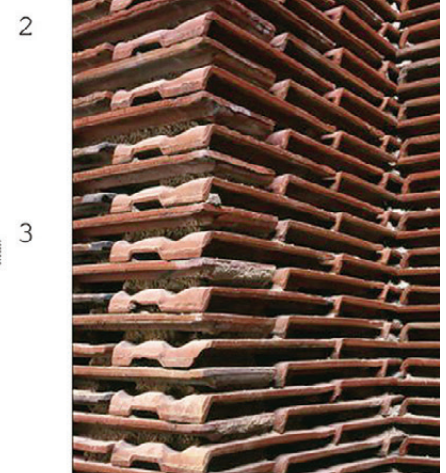
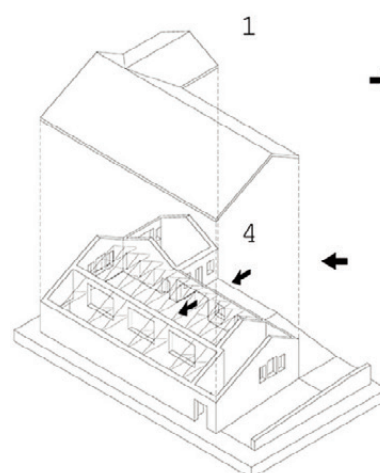
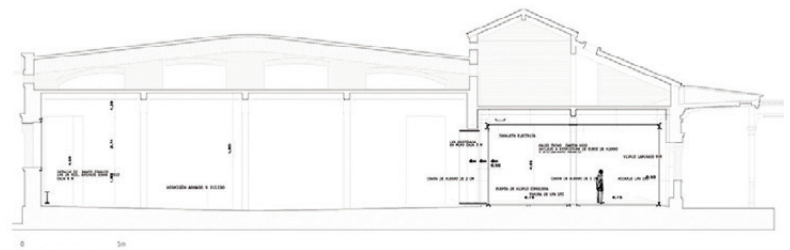
In dealing with modular architecture and its possible applications, the work of certain Spanish Masters has effectively investigated Argan's dual definition by working on the theme of prefabrication. Among the many examples one could cite, the research conducted by Miguel Fisac (1967, p. 9) represents a milestone in the framework of Spanish architecture. In fact, his works investigate the possibilities of that «[...] material pastoso que se echa en moldes» that is reinforced concrete used for structural forms, but also for the realisation of

external cladding or curtain walling elements. Fisac would devote almost his entire career to designing a series of prefabricated modular elements – later patented – that he would use to compose buildings through repetitive, but spatially innovative, assembly operations.

In the Model Laboratory of the Center for Hydrographic Studies (Fig. 6), for example, the rhythmic use of 'bone beams' (Arqués Soler, 1996; González Blanco, 2010; Fig. 7) shapes the space in close relationship with the rhythm of light introduced zenithally through the asymmetrical composition of the beam section. In the Church of Santa Ana, on the other hand, the expressive potential of prefabricated elements is tested in relation to the trend of concave and convex shapes, always amplified by the relationship with light (Figg.

8, 9). In his work, a single material is used to define spaces that aspire to combine useful and technically possible with beautiful (Castro, 1971). Special attention is always paid to the joints, which over time have proven to be the weakest elements of the structures, requiring, in some cases, the disassembly and reassembly of structural elements. The system used for joints, in our general reflection, is a cause for special attention since it can be understood as that design element that can make disassembly and reuse of structures more or less possible and/or easy over the life cycle of the building.

Fisac's work has generally been aimed at the design of buildings ex novo; however, in recent times, it is possible to identify interventions in Spain that, drawing on the tradition of Fisac's work, are



concerned with intervening on pre-existing structures to convert them back into function and reuse them. Some of Ensemble Studio's interventions can be understood according to this logic despite the differences. In the Reader's House⁶, developed by the Germán Sánchez Ruipérez Foundation and completed in 2012 inside the Matadero Madrid (Fig. 10), a series of prefabricated U-shaped beams, 23 meters in length, are used as the only element for the design definition. Crossing the basilica space of the pre-existing twin industrial buildings, the beams spatially resolve the relationship between the lower and upper floors. Without the introduction of intermediate supports, these prefabricated elements fit within the ancient structures, echoing the shape of the exterior canopies that connect a series of artefacts within the former slaughterhouse complex (Fig. 11). The powerful idea, in the final realisation, is flanked by the introduction of a series of metal elements or joints that give the overall image an appearance that tends toward the search for homogeneity and resonances between the existing artefact and the design of the new one, rather than the highlighting of differences.

The establishment of dialectical relationships between old and new also characterises other interventions within the structures of the former slaughterhouse. Architect Arturo Franco Díaz, together with Fabrice Van Teslaar, in Nave 17, entrusted to the institution *Intermediae* (Pastorelli, 2011; Fig. 12), experiments with the introduction of minimal and fully autonomous structural interventions that emphasise the process of deconstruction and construction. The existing building maintains all signs of time – almost in the form of a ruin – comprising new metal elements, exposed fixtures and window frames that define and enclose a (limited) set of air-conditioned spaces. In a constant dialogue between ancient and new, two different languages manifest two confronting positions. The exterior protective glass systems are also designed to create distance between the ancient building and the contemporary structure, to the point of producing an unusual relationship between architecture and nature (Fig. 13). In the entire project, the joint takes on a primary role as an element capable of separating and simultaneously uniting distinct worlds.

In Nave 8, Arturo Franco Díaz himself intervened in a small office building that mainly required roof restoration, structural reinforcement, and the installation of air conditioning systems (Franco and Van Teslaar, 2014). Although this case is not a 'dry' intervention, the Architect identifies new opportunities for the project in the mountains of

rubble derived from interventions on adjacent buildings. The entire space is defined through the insertion of high walls made through the horizontal assembly of flat tiles that produce vibration by establishing a simple construction system (Fig. 14, 15). A 'simple' traditional material is transformed from waste not only into a resource for the project but also into the only element capable of defining and modulating the entire space. The interest of this small project lies in the intelligent way of using materials combined with an ancient construction technique.

Although these interventions were not designed according to the rules and logic of Design for Disassembly, the design strategies employed more or less facilitate the disassembly of new structures. The gap could then be easily bridged by introducing and implementing, in the early stages of the project, an additional variable that incorporates the idea of the future for such structures, planning their disassembly, evaluating the choice of materials, studying in detail the elements of the composition and the connecting joints. Therefore, these operations can be understood as an 'added' element to methods, strategies, techniques and materials that have already been widely used and tested, while at the same time recovering those refined rules of good building of 'vernacular' architecture according to the place and specific climatic characteristics in which the building is set.

Conclusions and future developments | The various experiences presented reveal the possibility of holding together the outcomes of scientific and technological research with the identity status of architecture in contemporary design and construction processes. The outlook on the built and the design of the buildable, as the Spanish cases suggest, cannot ignore a reflection on the life cycle of buildings, on their transformability, reparability and disassemblability, as long as this increased competence to 'sustain' construction processes does not coagulate into knowledge that, from specific, would risk becoming sectoral.

Modular architecture, DfD and Urban Mining represent disciplines that offer the project many opportunities related to building flexibility and versatility in using materials, shifting the focus from the product to the two-way 'process'. These are practices that, if in compliance with specific procedures, can reduce construction costs by 30-60% (Ellen MacArthur Foundation, 2015) and encourage greater typological adaptability of building spaces, particularly for buildings in the tertiary sector that are subject to frequent fit-out renovations (Talamo et alii, 2021).

Despite a growing interest in these strategies, organisational and technical issues are slowing their implementation: the main difficulty is the performance quality of products resulting from disassembly processes to be reintroduced into reuse supply chains. In this sense, central are the processes – already indicated by the Building As Material Banks project (Peters et alii, 2017), including Reversible Building Design and Building Passport – which make it possible to reconstruct the past 'life' of elements and to assess their possible inclusion in the digital model of a future project (Viscuso, 2021). Buildings are thus likened to 'banks' of components that can be put back into circulation without changing their function or through total or partial transformation operations. The adoption of these digital platforms⁷ born in the last decade in Europe (Crippa and alii, 2022), however, leads to a 'correct' construction only if the logical-constructive concept underlying the whole and each part is the same (Mangiarotti, 2000).

In the Mediterranean and even more evidently in Italy (Baiani and Altamura, 2019), DfD methods and selective deconstruction have not yet assumed the characteristics of a 'different' chain compared to linear construction methods, due to numerous cultural and environmental resistances. Although Italian Ministerial Decree 11/10/2017 requires for public procurement that at least 50% of building components be subject to selective demolition or be recyclable or reusable at the end of their life, this provision has not been a 'driver' for non-regulated construction to date (Sposito and Scalisi, 2020).

For all of the reasons above, it is appropriate to reflect on the new skills that are required of the Architect, given an unprecedented approach to the project, skills not only related to an accurate knowledge of materials but also to the acquisition of a true awareness of the margin of compositional freedom to interpret, sift and appropriately select what is needed for construction in a circular building perspective. In the transition that takes place between Technology and Architectural knowledge, the project as a collection of components becomes a 'catalogue of inventiveness', an unprecedented way of looking at the work in its totality and in its parts, each of which is restored a value of meaning and a value of design.

Acknowledgements

The contribution results from a common reflection of the Authors in the general approach and final revision. However, the introductory paragraph, 'Objectives and critical issues', 'The module as a sustainable principle of order' and 'Conclusions and future developments' are to be attributed to G. Comi, and the paragraph 'Between architecture of the Masters and contemporaneity: the Spanish case' to C. Pirina.

This research is developed within the iNEST – Spoke 04

project. The project is funded by the European Union – Next GenerationEU. However, the views and opinions expressed are those of the Authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission, which cannot be held responsible for said views.

Notes

1) According to an ecological perspective, the «[...] human ecological perspective sees the economy not in isola-

tion, but rather as an inextricably integrated completely contained, and wholly dependent subsystem of the ecosphere. Moreover [...] economy and the ecosphere are complex self-organizing systems whose behaviour is governed [...] by evolutionary forces» (Rees, 1999, p. 5).

2) The 'cradle to cradle' approach is proposed as a system in which resources circulate without waste production. Building design involves using biodegradable materials, as pure as possible, and artificial, technical materials designed to be reusable. At end-of-life, the former can be reintegrated

into the environment and the latter can rejoin ‘industrial metabolism’, in both cases overcoming the problem posed by waste and its recycling. It differs from the ‘cradle to grave’ approach by which we denote the energy cost of a building calculated from the costs of raw material extraction, construction, operation, maintenance, demolition and waste disposal.

3) For more information, see the webpage: davidsuzuki.org/ [Accessed 10 October 2023].

4) Referring specifically to the tradition of ‘spolio’ architecture.

5) The term, frequently used by Spanish architects, is intended explicitly in 1916 by Heinrich Tessenow in his book *Hausbau und Dergleichen*, in which simplicity is identified as the rigorous pursuit of essential form.

6) For more information, see the webpage: ensamble.info/readershouse [Accessed 10 October 2023].

7) An example of this kind of online platform is Madaster, a system on which building data are inventoried and catalogued by creating an actual passport of materials. Registration of each component provides information on the degree to which an object is dismantled, the level of carbon incorporated, or the toxicity of the materials and products used, making it possible to determine whether they can be reused after disassembly.

References

- Argan, G. C. (1965), *Progetto e destino*, Il Saggiatore, Milano.
- Arqués Soler, F. (1996), *Miguel Fisac*, Ediciones Pronaos, Madrid. [Online] Available at: oa.upm.es/45622/ [Accessed 10 October 2023].
- Baiani, S. and Altamura, P. (2019), “Il Processo del Progetto per la Resource Productivity – Un Caso Studio | The Design Process towards Resource Productivity – A Case Study”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 83-92. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/592019 [Accessed 22 October 2023].
- Capria, F. and Mattei, U. (2017), *Ecologia del diritto – Scienza, politica, beni comuni*, Aboca, Sansepolcro.
- Castro, C. (1971), “Los arquitectos critican sus propias obras – Miguel Fisac”, in *Arquitectura*, n. 151, pp. 44-49. [Online] Available at: coam.org/es/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100-anios/etapa-1959-1973/revista-arquitectura-n151-Julio-1971 [Accessed 10 October 2023].
- Crippa, D., Cason Villa, M., Di Prete, B., Ratti, L., Rebaglio, A., Zanini, M. and Zanotto, F. (2022), “Verso un progetto circolare, tra architettura e allestimento – Piattaforme digitali per il riuso | Towards a circular project, between architecture and exhibition design – Digital platforms for reuse practices”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 234-245. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12212022 [Accessed 22 October 2023].
- De Leonardi, F. (2017), “Economia circolare – Saggio sui suoi tre diversi aspetti giuridici – Verso uno stato circolare?”, in *Diritto Amministrativo*, XXV, fasc. 1, pp. 163-207.
- Ellen MacArthur Foundation (2015), *Growth within – A circular economy vision for a competitive Europe*. [Online] Available at: mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe [Accessed 23 October 2023].
- European Commission (2020a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A New Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe*, document 52020DC0098, COM/2020/98 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2020%3A98%3AFIN [Accessed 10 October 2023].
- European Commission (2020b), *Circular Economy – Principles for Building Design*. [Online] Available at: ec.europa.eu/docsroom/documents/39984/attachments/1/translations/en/renditions/pdf [Accessed 10 October 2023].
- European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN [Accessed 10 October 2023].
- European Commission (2018), *Guidelines for the waste audits before demolition and renovation works of buildings*. [Online] Available at: ec.europa.eu/docsroom/documents/31521/ [Accessed 22 October 2023].
- European Commission (2016), *European Union Construction and Demolition Management Protocol*. [Online] Available at: ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/ [Accessed 22 October 2023].
- Fisac, M. (1967), “Breves reflexiones”, in *Arquitectura*, n. 99, pp. 9-10. [Online] Available at: coam.org/es/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100-anios/etapa-1959-1973/revista-arquitectura-n99-Marzo-1967 [Accessed 10 October 2023].
- Franco, A. and Van Teslaar, F. (2014), “Nave 8B de Matadero Madrid – Arturo Franco Díaz”, in *Tectónica*, 09/01/2014. [Online] Available at: tectonica.archi/projects/nave-8b-de-matadero-madrid/ [Accessed 10 October 2023].
- Gambato, C. A., Zerbi, S., Mosca, C. and Fibioli, I. (2022), *DeCo – Linee guida per la decostruzione degli edifici recenti*, SUPSI, Mendrisio.
- González Blanco, F. (2010), *Los Huesos de Fisac – La búsqueda de la pieza ideal*, PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, Madrid. [Online] Available at: ferminblanco.com/contenidos/120131+ARQUIA+TESIS+FISAC.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Guy, B. and Ciarimboli, N. (2007), *DfD – Design for Disassembly in the Built Environment – A guide to closed-loop design and building*, Pennsylvania State University. [Online] Available at: lifecyclebuilding.org/docs/DfDseattle.pdf [Accessed 10 October 2023].
- IEA – International Energy Agency (2013), *Technology roadmap – Energy efficient building envelopes*. [Online] Available at: iea.org/reports/technology-roadmap-energy-efficient-building-envelopes [Accessed 10 October 2023].
- Keoleian, G. A. and Menerey, D. (1993), *Life Cycle Design Guidance Manual – Environmental Requirements and the Product System*, Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-92/226. [Online] Available at: css.umich.edu/sites/default/files/publication/CSS-9-02.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Mangiarotti, A. (2000), *Pratica alla via analitica in architettura*, in Dal Lago, A. (ed.), *Progettare e Costruire nel XXI secolo*, Abitare Segesta, Milano, pp. 106-115.
- Mazzucato, M. (2021), *Missione economia – Una guida per cambiare il capitalismo*, Laterza, Roma.
- McDonough, W. and Braungart, M. (2002), *Cradle to Cradle – Remaking the Way We Make Things*, North Point Press, New York.
- Pastorelli, G. (2011), “Intermediae Matadero Madrid / Arturo Franco”, in *archdaily*, 27/05/2023. [Online] Available at: archdaily.cl/cl/723647/intermediae-matadero-madrid-arturo-franco [Accessed 10 October 2023].
- Pauli, G. (2010), *The blue economy – 10 Years – 100 Innovations – 100 Million Jobs – Report to the Club of Rome*, Paradigm Publications, Taos.
- Peters, M., Ribeiro, A., Oseyran, J. and Wang, K. (2017), *Building As Material Banks and the need for innovative business models*. [Online] Available at: bamb2020.eu/wp-content/uploads/2017/11/BAMB_Business-Models_20171114_extract.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Pomponi, F. and Moncaster, A. (2017), “Circular economy for the built environment – A research framework”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 710-718. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055 [Accessed 10 October 2023].
- Pomponi, F. and Moncaster, A. (2016), “Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment – What does the evidence say?”, in *Journal of Environmental Management*, vol. 181, pp. 687-700. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.036 [Accessed 10 October 2023].
- Rees, W. E. (1999), “The Built Environment and Ecosphere – A global Perspective”, in *Building Research & Information*, vol. 27, issue 4-5, pp. 206-220. [Online] Available at: doi.org/10.1080/096132199369336 [Accessed 10 October 2023].
- Rigillo, M., Galluccio, G. and Paragliola, F. (2023), “Digitale e circolarità in edilizia – Le KETs per la gestione degli scarti in UE | Digital and circularity in building – KETs for waste management in the European Union”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 247-258. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13212023 [Accessed 22 October 2023].
- Russo, M. (2021), “Innesto, manomissione, ricostruzione – Tre modelli di riuso adattivo | Addition, alteration, reconstruction – Three models of adaptive re-use”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 9, pp. 92-101. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/992021 [Accessed 11 October 2023].
- Sposito, C. and Scalisi, F. (2020), “Ambiente costruito e sostenibilità – Materiali riciclati e Design for Disassembly tra ricerca e buone pratiche | Built environment and sustainability – Recycled materials and Design for Disassembly between research and good practices”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 8, pp. 106-117. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8102020 [Accessed 22 October 2023].
- Talamo, C., Lavagna, M., Monticelli, C., Zanelli, A. and Campioli, A. (2021), “Remanufacturing – Strategie per valorizzare l’estensione della vita dei prodotti edilizi a breve ciclo d’uso | Remanufacturing – Strategies to enhance the life extension of short-cycle building products”, in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 22, pp. 71-78. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-10591 [Accessed 10 October 2023].
- UN – General Assembly (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf [Accessed 10 October 2023].
- UN – United Nations (2023), *The Sustainable Development Goals Report 2023 – Special Edition*. [Online] Available at: unstats.un.org/sdgs/report/2023/?_gl=1*1kgb2c2*_ga*MTE0NzQ2NjM5MC4xNjk4MzMwNDU0*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5ODMzMzMDQ1NC4xLjAuMTY5ODMzMzMDQ1NC4wLjAuMA [Accessed 23 October 2023].
- Viscuso, S. (2021), “Coding the circularity – Programmare il disassemblaggio e il riutilizzo dei componenti edili | Coding the circularity – Design for the disassembly and reuse of building components”, in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 22, pp. 271-278. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-10620 [Accessed 10 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	10 September 2023
Revised	09 October 2023
Accepted	26 October 2023
Published	31 December 2023

MODULI COMPOSITIVI

Prospettive per antichi patrimoni
verso la transizione ecologica

PROJECT MODULES

Prospects for ancient heritage
towards ecological transition

Luca Velo, Alberto Cervesato

ABSTRACT

Per i territori marginali del nord-est italiano si vogliono formulare progetti esplorativi di rigenerazione, capaci di raccordare, attraverso un approccio multidisciplinare, la scala territoriale e la scala architettonica. Il concetto di modulo può essere alla base dell'intero processo rigenerativo a partire dal recupero e dal riuso del patrimonio edilizio esistente. Lo scopo è utilizzare un modulo architettonico capace di adattarsi, in forma singola o aggregata, scomponendo il tessuto urbano e ricomponendolo in forme nuove, atte a mediare tra lo spazio pubblico e privato, divenendo l'immagine di un rinnovato archetipo compositivo. La scelta architettonica si pone priva di funzioni prestabilite permettendo di anticipare in molteplici contesti i processi di rigenerazione, operando sulle potenzialità dell'indeterminatezza, sui ritmi e sugli accostamenti.

For the marginal territories in northeastern Italy, there is a desire to formulate exploratory regeneration projects capable of bridging, through a multidisciplinary approach, the territorial and architectural scales. The concept of a module can serve as the foundation for the entire regenerative process, starting with the recovery and reuse of existing building heritage. The aim is to employ an architectural module capable of adapting, either as a single unit or when aggregated, by disassembling the urban fabric and reassembling it into new forms, designed to mediate between public and private space, thereby becoming the embodiment of a renewed compositional archetype. The architectural choice is made without predefined functions, allowing for the anticipation of regenerative processes in multiple contexts, operating on the potential of indeterminacy, rhythms, and juxtapositions.

KEYWORDS

marginì, rigenerazione, modulo architettonico, adattabilità, sostenibilità

margins, regeneration, architectural module, adaptability, sustainability

Luca Velo, Architect and PhD, is a Researcher at the Department of Culture of the Project at the Iuav University of Venice (Italy). He is a member of the Scientific Committee of the PhD Program in Urban Planning at the Iuav Doctoral School in Venice. His research focuses on urban regeneration, social innovation, and sustainable accessibility, particularly in hilly and low-density settlement contexts. Since 2023, he has been the Iuav Scientific Coordinator for the Erasmus+ MéLiMed project (Mediterranean coastal metropolis, climate challenges, and resilient solutions) in collaboration with ENSA Marseille, ULB Brussels, and ENA Rabat. E-mail: lucavelo@iuav.it

Alberto Cervesato, Architect and PhD, is a Research Fellow and Adjunct Professor at the Polytechnic Department of Engineering and Architecture at the University of Udine (Italy). His research encompasses the enhancement of architectural and urban heritage, including international work at the University of Morón in Buenos Aires (Argentina). He serves as the President of the Association of Architect Alumni Udine and is a member of the Board of the Vicino / Lontano Association. E-mail: alberto.cervesato@uniud.it



Considerando l'ampio lavoro svolto dall'Agazia per la Coesione Territoriale all'interno della Strategia Nazionale per le Aree Interne – SNAI (DPC, 2014), il saggio prova a sviluppare una metodologia di rigenerazione che, attraverso un approccio multidisciplinare a scala territoriale e architettonica, proponga un nuovo archetipo compositivo basato sull'utilizzo di un modulo architettonico adattivo. L'ipotesi trova punto di avvio nell'ambito del Bando Borghi, un avviso pubblico finalizzato a promuovere progetti per la rigenerazione del patrimonio dei borghi (Ministero della Cultura, 2022), e nelle attività promosse dal Consorzio iNEST – Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem¹, un nuovo modello di ecosistema dell'innovazione costituito da una rete di Università, Enti di ricerca e soggetti pubblici e privati.

L'ambito di riferimento è formato da un articolato sistema di piccoli Comuni (Figg. 1, 2), spesso lontani dai servizi essenziali legati all'istruzione, alla salute e alla mobilità ma che occupano quasi il 60% del territorio nazionale nel quale risiede meno del 25% della popolazione (De Rossi, 2018). Queste aree possono considerarsi dei veri e propri laboratori di sperimentazione per definire possibili modelli di sviluppo diventando esempi da adottare anche in altri contesti territoriali (Carrosio, 2019) partendo dal presupposto che le questioni legate ai territori fragili impongono l'individuazione e il rafforzamento di potenzialità locali (Boi et alii, 2018; Dall'Ara and Villani, 2020; Baró Zarzo, Poyatos Sebastián and Martínez Martínez, 2020; Brignoni et alii, 2023) e riconoscendo il ruolo che i luoghi al margine possono assumere nel favorire la transizione verso nuovi modelli di sviluppo (Gallerisi, 2023).

I dati forniti dall'ISTAT (2022) evidenziano come, in questi territori, il decremento demografico sia più accentuato rispetto alla media nazionale e costituisca una questione non solo complessa ma anche strategica per la salvaguardia dei borghi e di ampie porzioni del Paese. Partendo da queste tracce si ipotizza l'applicazione di una metodologia di ricerca che cerchi di formulare progetti esplorativi di rigenerazione riferendosi a sguardi transdisciplinari: «[...] per leggere, capire e di conseguenza progettare con lo scarto, con i luoghi rifiutati, marginali, abbandonati, è necessario cercare tra le pieghe del sapere, accogliere sguardi trasversali che ragionano nel campo dell'arte o delle scienze» (Marini, 2010, p. 11).

Si ipotizza una scelta progettuale che parta da un modulo come principio generatore del progetto. La scelta architettonica si pone priva di funzioni prestabilite permettendo di anticipare, verificare e accelerare, in molteplici contesti spaziali, i processi di rigenerazione, operando sui ritmi e sugli accostamenti (Viganò, 1999). In questo modo tale forma progettuale potrebbe diventare uno strumento utile anche per le Pubbliche Amministrazioni nella definizione e nello sviluppo di politiche di rigenerazione mirate.

La metodologia proposta prende avvio da un'analisi territoriale del contesto di riferimento, alcuni paesi rurali caratterizzati da fenomeni di spopolamento, per poi declinarsi alla scala del progetto architettonico, concretizzandosi in una pratica sperimentale di riuso dei manufatti architettonici e urbani, operando direttamente sulle preesistenze. L'esplorazione riarticola i principali temi del dibattito dei settori disciplinari (urbanistica

e composizione architettonica) ponendo l'attenzione sull'indeterminatezza come principio che permetta di anticipare i processi rigenerativi e sulle potenzialità di utilizzo delle architetture modulari.

I casi studio rientrano nelle sperimentazioni condotte nel Comune di Stregna, paese nelle Valli del Natisono lungo la fascia collinare orientale della Provincia di Udine, tenuto conto anche di alcuni casi internazionali. La riflessione prospetta una riformulazione complessiva in termini di gestione, anche energetica e ambientale, di molti aspetti tecnologici afferenti sia la scala territoriale che quella edilizia. Una particolare attenzione è rivolta alla sostenibilità economica, in termini di costi diretti e indiretti, dal cantiere alla gestione del processo architettonico, secondo paradigmi propri del riuso, del recupero, del riciclo dei materiali nel rispetto dei valori materiali e immateriali che i borghi come fatti urbani e architettonici esprimono, nella precisa consapevolezza che ogni abbandono comporta una ricostruzione e ogni scomparsa apre a nuove presenze (Teti, 2004).

Identificare i caratteri delle strutture territoriali nel nuovo millennio | Isolare i caratteri specifici di un territorio richiede una strategia di attenzione che impone di immaginare un processo di restituzione capace di raggiungere un'incisiva selezione di temi, problemi e oggetti. Si tratta di un processo di ricostruzione che avviene solo apparentemente in modo non sistematico, iniziando da alcuni luoghi, questioni o istanze e lasciandone sullo sfondo altri.

Definire i caratteri territoriali significa immaginare mappe e restituzioni che pretendono di selezionare elementi capaci di restituire una struttura o un sistema territoriale (Fig. 3), costituito da relazioni ed eccezioni che possono trovare occasioni di scalabilità, sfociando in idee e ambiti in grado di attraversare le singole discipline. Il termine struttura lo si intende nell'accezione ascrivibile sia al livello concettualmente più semplice, come meccanismo di funzionamento, che a quello più complesso, in questo caso come 'frame' (Secchi and Merini, 1992) o ancora come organizzazione concettuale entro immagini, strategie, scenari per lo spazio e il tempo che definiscono un'ecologia dello sguardo tipica della Scuola gibsoniana, in grado di evidenziare come il soggetto e l'oggetto della vista siano l'uno in funzione dell'altro (Lanzani, 2022). Il territorio dei borghi italiani necessita di costruire un soggetto tematico in cui l'esplorazione progettuale (talvolta intesa come contributo disciplinare, altre volte come esito professionale) possa essere guidato verso obiettivi chiari e condivisi, soprattutto in stretta relazione ai temi delle risorse (umane e energetiche), del capitale naturale (Schumacher, 2011) e dei servizi ecosistemici (Scalisi and Ness, 2022; Lombardini, Pilogallo and Tucci, 2023).

Se le forme urbane e architettoniche si traducono con sempre maggiore enfasi nei temi della sostenibilità, nelle idee di uguaglianza sociale, nelle nuove forme di governo e di comfort, con esiti spesso multiformi, rimane aperta la domanda sul come quel progetto possa affrontare temi come la previsione e la durabilità. Una questione certamente ontologica che oggi sorge, coinvolgendo tanto l'Urbanistica quanto l'Architettura (come molte altre discipline), e rimette al centro una situazione di crisi generale ormai dai caratteri sempre più duraturi. Metaforicamente la situazione ri-

manda al celebre schema vitruviano ripreso da Abbé Laugier (1755; Fig. 4) nel quale l'architettura impersonificata da una giovane fanciulla, assisa su rovine classiche, indica a un bambino, personificazione dell'umanità, una capanna primitiva, completamente priva di difetti e imperfezioni, diversa e libera da archetipi e interpretabile come nucleo generatore di ogni architettura (Biraghi, 2021).

Rientra forse in questo la suggestione che un modulo di partenza, ripetibile e scalabile, possa essere necessario alla riconcettualizzazione e alla costruzione di uno spazio, come quello dei borghi, interno a molteplici nature (Banham, 2009; Hunt, 2004), spesso differenti tra loro, intendibili sia in senso ambientale-produttivo che ecologico. La metafora iconografica del Laugier riafferma la consapevolezza di trovarsi all'interno di un passaggio epistemologico epocale – come allora dal Barocco al Neoclassicismo – che non coinvolge solo le forme più consolidate dello spazio, costituito ormai da un surplus edilizio, ma anche le economie, le pratiche e il mantenimento stesso delle risorse essenziali alla sopravvivenza. In questo, ricomponendo la metafora in forma diacronica oggi rispetto ai temi della transizione ecologica, a quel bambino (personificazione dell'umanità) l'architettura indicherebbe forse di ripartire da un'immensa estensione di rovine molto eterogenee tra loro.

Il modulo, dispositivo per il progetto della transizione | La transizione ecologica come stagione progettuale specifica non è ancora propriamente determinata nel pieno periodo dell'Antropocene (Plevani and Varotto, 2021) e il ruolo che dovranno giocare le discipline connesse all'architettura e all'urbanistica richiama alla distribuzione di nuovi orizzonti teorici oltre che di nuovi dispositivi e strumenti. Qui risiede l'ipotesi di questo contributo che consiste nel riconoscere come la predeterminazione di alcune forme progettuali, definite a partire dalle specificità territoriali, rientrino nella definizione e nel disegno di moduli di base. Il disegno del modulo, la sua misura e definizione, anche in termini di materiali, entro forme coerenti e appropriate alle nuove condizioni, si intrecciano alle questioni di indeterminatezza proprie della transizione ecologica.

Non si tratta certamente di residui teorici di una tradizione modernista, definita da un approccio top down e da un controllo integrale sullo spazio, quanto di occasioni offerte da un nuovo periodo del progetto dello spazio fisico. Per tale motivo al modulo si associa una parola chiave come dispositivo (Agamben, 2007), ossia come un insieme di sistemi, questioni, metodi, apporti normativi, pratiche e forme di gestione del territorio ma soprattutto di razionalità spaziali.

Il modulo in questo caso si incardina in una cornice filosofica differente rispetto al passato, all'opposto di sguardi ampi, della denuncia, della compassione e dell'indignazione (Bianchetti, 2011) per lasciare spazio a ruoli strategici concreti all'incrocio di saperi e funzioni sempre meno circoscrivibili secondo logiche razionaliste ma sempre più proiettati verso possibili 'divenire'. In questo risiede il carattere di novità nell'uso di questo termine, di matrice foucaultiana (Foucault, 2016), che discute il ruolo stesso dell'esito progettuale. Inoltre, nella cornice di una transizione ecologica dai caratteri sempre più marcatamente legati non tanto

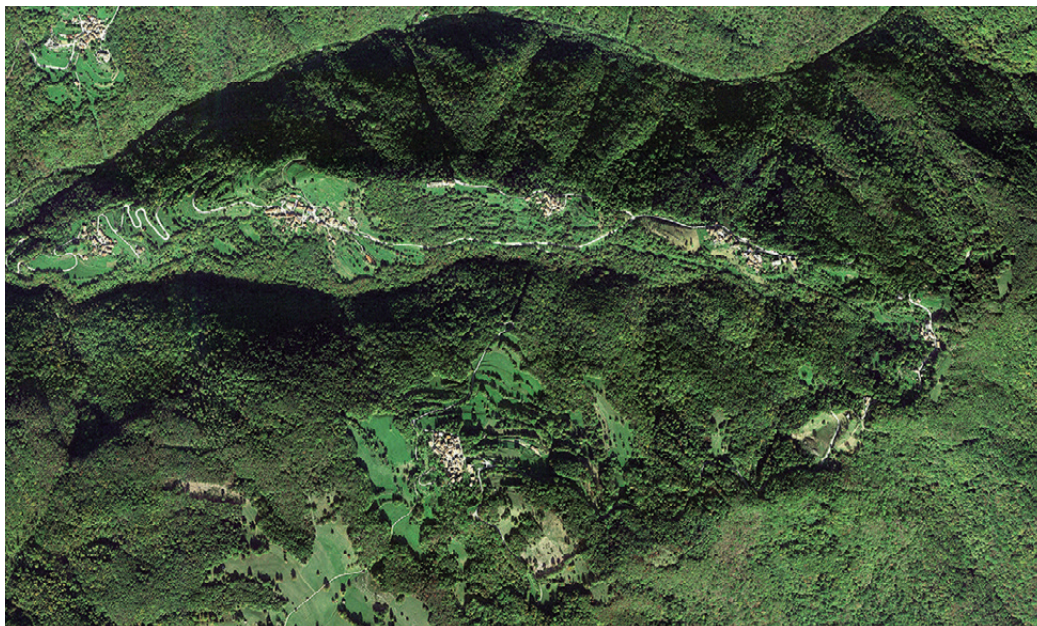


Fig. 1 | Orthophoto of the Natisone Valleys, Udine Province: a system of small Municipalities (credit: Google Earth, 2023).



Fig. 2 | View of the case study, Municipality of Stregna, Udine Province (credit: the Authors, 2022).

alle intenzioni ma ai tempi, l'orizzonte fissato sembra cambiare (Mantziaras, 2020); infatti, se le Nazioni Unite parlano di 2030 (UN – General Assembly, 2015) e l'Unione Europea di 2050 (European Commission, 2018), in questo scarto temporale il progetto della transizione in alcuni contesti appare sempre più evanescente, privato di valori spaziali, tecnologici e sociali laddove il futuro possa sembrare un orizzonte infinito.

In molti contesti italiani, in modo particolare nelle aree interne e in tanti luoghi sottoutilizzati e abbandonati (è questo il caso di alcuni borghi montani e pedemontani), un progetto di transizione sembra non essere capace di mettere in evidenza i propri caratteri in maniera immediata. Per questo motivo appare opportuno sottolineare almeno due punti.

In prima istanza va tenuto presente che le rappresentazioni spaziali hanno una rilevanza particolare, oggi più di ieri, poiché riguardano uno spazio-ambiente che è comune non solo a tutti gli esseri umani ma all'insieme degli esseri viventi e alle loro aggregazioni territoriali di vario livello (Dematteis, 2021). La complessità dello spazio contemporaneo è molto alta e definire le strutture di funzionamento resta, per molti versi, al di fuori delle competenze e conoscenze di chi di fatto produce il progetto; il grado di indeterminazione quindi andrebbe controllato e argomentato proprio per fare sì che le variazioni di pratiche, usi o condizioni ambientali possano ben rispondere a esigenze future (de Jouvenel, 1967).

Il progetto non può quindi limitarsi a definire uno spazio della propria vita ma di fatto è l'atto selettivo che orienta verso connessioni di fatti e aspetti pertinenti tra loro. Per pertinenti si intendono quelle manifestazioni materiali le cui apparenze sono capaci di evocare nel contempo i caratteri oggettivi dei fenomeni (quelli appartenenti alle diverse discipline) e la soggettività dei loro significati economici, sociali, culturali, politici oltre che ideologici etici ed estetici (di qui ci si può riferire a recenti politiche dell'Agenzia per la Coesione Sociale per lo sviluppo e il sostegno delle imprese che operano in aree

interne e borghi). In questo modo, partire da un modulo di base significa adottare apertamente un linguaggio elementare delle cose che orienti in modo semplificato il divenire.

Tale complesso sistema di rapporti materiali e immateriali rimanda al ruolo metaforico del modulo che è allo stesso tempo qualcosa di più specifico e complesso di una componente architettonica situata; esso diventa strumento di composizione e intervento su scala territoriale, capace di generare paesaggi in una rete ampia e costantemente implementabile di significati, elemento sfidante per chi si cimenta nella difficile arte di progettare e governare lo spazio (Gambino, 1997).

Il secondo punto riguarda le possibili relazioni che il modulo, inteso come elemento generatore, possa stabilire alla scala territoriale e puntuale, in termini sia di relazioni orizzontali (di scambio e comunicazione tra le differenti parti di territorio e gli altri luoghi) sia le relazioni verticali (tra gli eventi di un determinato luogo e il substrato culturale). Il modulo si fa portatore quindi di una sorta di progetto implicito (Viganò, 2017) che si esprime e si rappresenta con strumenti differenti, che variano di volta in volta nelle gerarchie, nelle geometrie e nel disegno dei materiali costitutivi della maglia stradale, definendo luoghi significativi, distribuendo attrezzature urbane, permettendo di ridiscutere norme che possono regolare in modi più o meno dettagliati le possibilità edificatorie e i diritti proprietari (come ad esempio nei Comuni delle Valli del Natisone; Figg. 5, 6), ma anche i rapporti tra pieni e vuoti, tra spazio pubblico e privato e distanze tra volumi.

Il modulo quindi diventa non solo uno strumento analitico-interpretativo ma anche contributo normativo processuale alle scienze territoriali e architettoniche all'interno di una cornice culturale sempre più globalizzata che necessariamente deve fare i conti con relazioni verticali, in particolare sulla reciproca interazione tra esseri viventi e ambiente, tra società e biosfera in cui il binomio sovrapposizione e penetrabilità emerge come principio per azioni essenziali imposte da un nuovo

regime climatico (Latour, 2020) senza le quali è facile ricadere in modalità poco innovative.

Un simile progetto andrebbe a rispondere a bisogni immediati e futuri, colmando talvolta vuoti non solo di immaginario ma anche di gestione, sia su scala pubblica che privata, garantendo un controllo in termini di consumo di risorse e inducendo approcci maggiormente interpretativi dei fenomeni di mercato (Schön, 1993). L'attuale tendenza ormai rivela alcuni scenari che dichiarano inequivocabilmente l'urgenza di abbandonare logiche espansive in favore di una più generale riduzione di risorse. Permane soprattutto un tema di compensazione che toccherà in modo determinante le attività umane e le pratiche collettive e che dovrà stabilire chiaramente quali saranno gli effetti diretti e indiretti di ogni attività in termini di emissioni di CO₂ nell'atmosfera. Di qui il progetto di transizione nuovamente si misurerà all'interno di moduli e parametri molto concreti che dovranno essere condivisi da forze sociali ed economiche oltre che culturali e politiche.

Indeterminatezza programmatica come principio compositivo

Nel rileggere le diverse sperimentazioni che si sono susseguite negli ultimi anni come tentativi per rigenerare le aree marginali, vengono richiamati temi come il turismo, la cooperazione e lo smart working, in un ampio panorama di possibili strade da percorrere per dare valore all'architettura di questi luoghi (Cucinella, 2018). Alcune esperienze, in modo puntuale, dimostrano di aver generato modificazioni positive, ma risulta complesso condurre astrazioni rispetto al contesto specifico, al fine di definire buone pratiche. Partendo da questa condizione di incertezza, si vuole cercare di caratterizzare gli interventi sul patrimonio edilizio slegandosi dalle questioni strettamente funzionali che un determinato borgo potrà assumere provando strategicamente a trascurare l'utilizzo del singolo edificio.

La contemporaneità è caratterizzata da incertezze costanti, causate da crisi ambientali, economiche e migratorie (Carrosio, 2019), ma più in ge-

nerale sembra che «[...] in Italia alcune quantità stiano facendo la qualità dei paesaggi, che una moltitudine di materiali, dinamiche e soggetti singolarmente non sempre rilevanti ma cumulativamente incisivi [...] stiano producendo fenomeni di costruzione e modificazione» (Ippolito, 2019, p. 9). Questa condizione, che ha tutte le sembianze di un fenomeno negativo, può diventare l'occasione per definire un nuovo paradigma del fare architettura nei processi di rigenerazione: «[...] l'inquietudine della fluttuazione programmatica può essere interpretata come vantaggio. [...] La soluzione all'indeterminatezza interna sarà semplicemente la proliferazione di strutture dotate di una pelle articolata» (Holl, 2004, p. 85).

Si apre alla possibilità di adottare una metodologia che preveda un'attività progettuale condizionata dall'incertezza tale da permettere di ipotizzare funzioni molteplici per un determinato edificio, definendo un esito contraddistinto da «[...] una cosciente ricchezza programmatica» (Holl, 2004, p. 85). Si tratta di ripensare un modo di immaginarsi nello spazio a prescindere dalle azioni che in tale spazio si andranno a svolgere, tenendo in considerazione il fatto che «[...] un progetto non può prevedere le crepe che si apriranno in futuro; esso descrive uno stato ideale a cui ci si può soltanto approssimare» (Koolhaas, 2001, p. 9).

Nel definire le scelte progettuali degli interventi di riuso del patrimonio edilizio presente nei territori fragili, è da considerare che «[...] ogni edificio deve prendere atto dei sistemi esterni esistenti, anche se questi possono effettivamente essere considerati come parti di un futuro ordine assoluto [...] pensato come continuo e capace di accettare crescita e cambiamento» (Eisenman, 2014, p. 24). Questo punto di vista mette in valore scelte progettuali che cercano di trovare dei valori in termini assoluti e non per questioni legate a singole specificità, favorendo quindi lo sviluppo di progetti portatori di principi universali di sostenibilità e accessibilità, nel pieno rispetto degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile 2030 (UN, 2015).

Architetture modulari adattive | L'utilizzo del modulo definisce il fulcro della metodologia progettuale e rappresenta il punto di partenza per lo sviluppo del processo di sperimentazione. Tale processo adotta le architetture modulari pensando sia agli aspetti formali e strutturali che definiscono il manufatto architettonico, sia alla ricerca dei più alti livelli qualitativi di efficienza energetica, innovazione tecnologica, adattabilità e più in generale sostenibilità.

Una prima fase prevede un'operazione di rilettura delle componenti significative dei manufatti esistenti per offrire un'analisi finalizzata a comprendere gli elementi di specifica connotazione tipologica (Fig. 7). Questa operazione di disgregazione nei singoli elementi compositivi del manufatto architettonico si costruisce sull'idea che «[...] l'elenco disintegra il blocco, annovera gli elementi senza classificarli, li risemantizza nella specifica datità [...] e nelle sequenze proporzionali. Le successive invarianti corroborano l'elenco disfaccendo i tabù della simmetria, dei tracciati geometrici, degli impianti prospettici, scomponendo

il volume in lastre, liberandone gli angoli sul piano strutturale, temporalizzando lo spazio; ma così facendo, stimolano ad una reintegrazione degli elementi elencati» (Zevi, 1973, p. 57).

Scomposizione e successiva reintegrazione sono concetti alla base della metodologia applicata per la definizione del modulo progettuale da adottare nei processi di rigenerazione per il patrimonio architettonico ma «[...] è solo quando le considerazioni di intento e funzione diventano operative che le dimensioni dei moduli possono essere determinate non solo in termini di economia strutturale, ma anche di scala adatta ad accogliere il numero massimo di funzioni specifiche previste» (Eisenman, 2014, p. 29). È quanto di fatto accaduto in alcune recenti sperimentazioni della regione metropolitana parigina, attraverso l'iniziativa di partenariato pubblico e privato, Toits Temporaires Urbains (2019-2023) che ha realizzato un sistema modulare di residenze temporanee, studiate in funzione di comfort e di performance energetica, in grado di installarsi in spazi urbani residuali e capaci di esercitare attrattività in luoghi marginali.

Si ipotizza quindi di applicare tali concetti in alcuni borghi del nord-est italiano che hanno subito i fenomeni più intensi di spopolamento, coincidenti con l'area delle Valli del Natisone. Il territorio in oggetto è caratterizzato da sorgenti d'acqua, definito da terrazzamenti tradizionali (oggi riconosciuti come elementi identitari), da una massiccia presenza di aree boschive in continua crescita e da ambiti di marcata biodiversità (Regione Friuli-Venezia Giulia, 2018). Il Comune di Stregna rappresenta il caso di studio dove le nuove architet-

ture, esito di questa ricerca, cercano di dimostrare il loro potenziale. Partendo dall'analisi tipologica degli edifici presenti all'interno del paese, si individuano la forma e la dimensione del modulo che va a definire i diversi manufatti. La fase di rilievo e successiva rilettura delle preesistenze costituisce un momento fondamentale della ricerca, non solo perché permette di definire gli aspetti formali e dimensionali, ma anche per il contributo che fornisce allo studio dei materiali, individuando il legno (Fig. 8) e la pietra come principali componenti degli edifici (Fig. 9).

L'esito della fase iniziale di studio permette di definire il modulo base di rigenerazione e disegna un manufatto con una pianta di dimensioni dieci per sei metri che si sviluppa in altezza fino a due piani fuori terra (Fig. 10). Questo modulo è il punto di partenza dal quale estrapolare tutte le successive elaborazioni che verranno formulate e che hanno generato centinaia di soluzioni progettuali per la rimessa in funzione degli edifici. Le ipotesi applicative delle architetture modulari vengono successivamente suddivise basandosi su criteri ben definiti.

Una prima classificazione divide i progetti in due categorie: 1) intervento sui ruderi – su singoli edifici, parzialmente crollati o in rovina, di cui rimane l'apparato murario o di copertura (Fig. 11); 2) costruzione di macrostrutture tra più edifici – strutture leggere di collegamento o funzionali a più edifici con lo scopo di creare spazi comuni e di raccordo (Fig. 12). Lo stesso modulo si adatta, si aggrega, viene scomposto e ricomposto, in un processo di transizione degli spazi pubblici e privati, collettivi o intimi. Un articolato lavoro di clas-

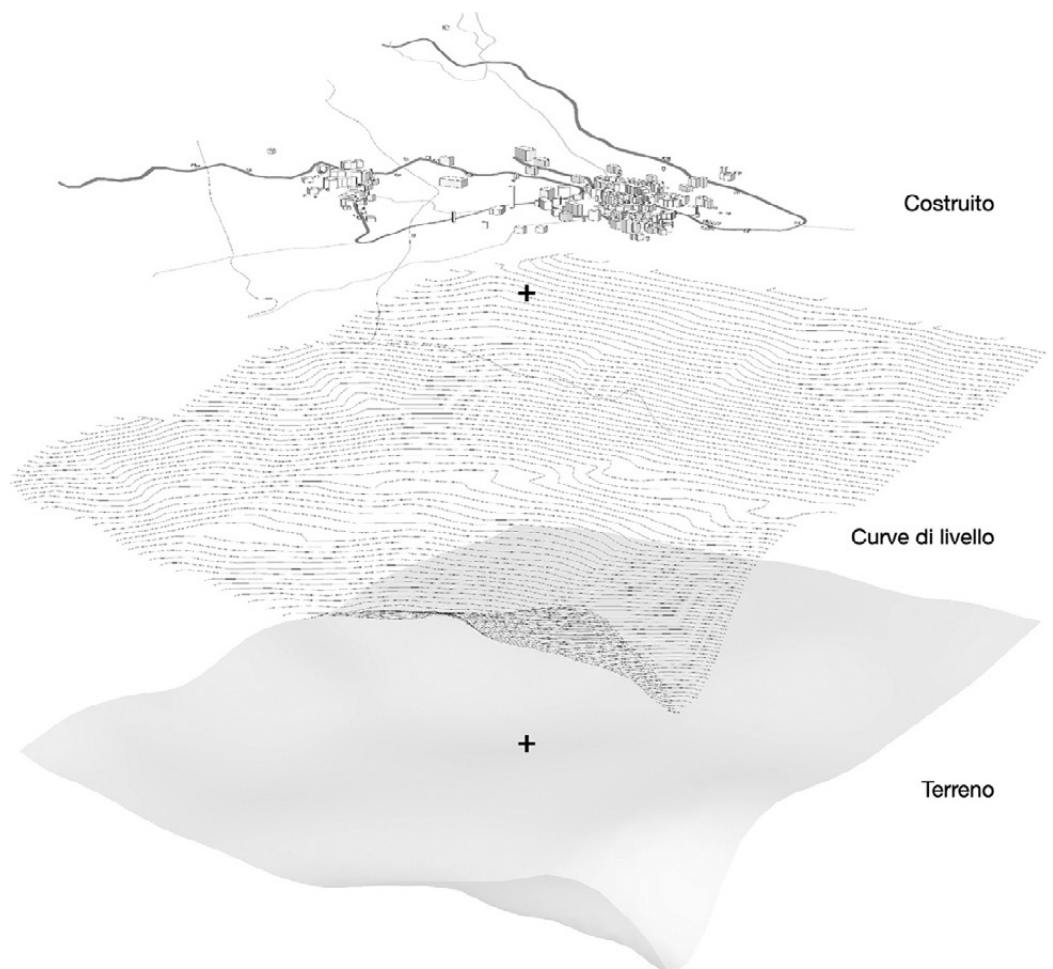


Fig. 3 | Axonometric exploded view for defining a spatial structure (credit: the Authors, 2023).

sificazione offre infine una serie di rappresentazioni delle soluzioni progettuali, volutamente in forma indicativa, sintetica e diagrammatica, proprio in risposta al tessuto edilizio estremamente differenziato e disomogeneo.

Criticità e scenari futuri | Gli obiettivi della ricerca rientrano nell'utilizzo del concetto di modulo che sta alla base dell'intero processo rigenerativo. Utilizzare un modulo architettonico ripetibile e adattabile, in forma singola o aggregata, tenendo assieme più moduli tra loro e scomporre il tessuto urbano esistente ricomponendolo in forme nuove secondo un ruolo di mediazione tra lo spazio pubblico e privato, sono operazioni che fanno emergere l'immagine di un rinnovato archetipo compositivo. L'esito è un progetto che prova a ridisegnare il paesaggio, per esempio attraverso il recupero dei terrazzamenti (Fig. 13), a ridefinire gli spazi aperti, ridiscutendo i confini tra pubblico e privato, o ancora a rifunzionalizzare gli edifici del borgo (Figg. 14, 15), integrando pratiche progettuali 'parassitarie' attraverso l'inserimento di elementi architettonici nuovi in edifici preesistenti (Marini, 2015).

Questo approccio appare ancora inesplorato per la gestione dell'ampio patrimonio abbandonato e in via di abbandono, in quanto può offrire alle Amministrazioni pubbliche e ai portatori di interesse locali strumenti pratici di gestione proattiva dei processi rigenerativi. L'indeterminatezza delle architetture diventa un punto di forza, a prescindere dalla funzione che i singoli edifici andranno ad assumere, aprendo all'avvio di processi che possano ridurre tempistiche progettuali e rimandando a una fase successiva l'approfondimento, da parte del progettista, delle singole specificità.



Fig. 4 | Frontispiece of the volume *Essai sur l'Architecture* (1755) by Marc Antoine Laugier (credit: stock image).

Troppo spesso i piccoli Comuni si trovano impreparati e privi di adeguati strumenti per accedere ai diversi bandi di finanziamento a loro rivolti e questa ipotesi può diventare supporto alla definizione di soluzioni ripetibili in diversi contesti.

La metodologia, data la natura di forte modificazione dei possibili manufatti coinvolti, può incontrare resistenze forti nella sua diffusione soprattutto da parte di un sentire comune, legato a un'interpretazione pittoresca del borgo, funzionale alla rievocazione di atmosfere e convivialità, nel totale contrasto a possibili trasformazioni anche più radicali per questi spazi. Nella cornice di tali operazioni, i processi rigenerativi dovrebbero aprirsi non solo a funzioni di tipo turistico ma soprattutto dovrebbero cercare di rendere abitabili anche luoghi non particolarmente attrattivi o che non rientrano in 'categorie estetizzanti' (Barbera, Cerosino and De Rossi, 2022). Fermo restando un approccio legato alla conservazione filologica e al restauro, per quanto riguarda i beni di pregio e vincolati, l'ipotesi del contributo auspica un approccio maggiormente selettivo sul costruito, ipotizzando che in alcuni contesti le modificazioni modulari possano integrarsi alle forme di prescrizione edilizia e di vincolo, sostenendo la riattivazione di comunità e di produzioni e predisponendo le condizioni per un adeguamento maggiormente contemporaneo e sistemico.

La condivisione delle strategie progettuali elaborate può costituire esempio di buone pratiche da replicare in contesti diversi da quelli dove la sperimentazione si è sviluppata, generando un possibile interesse a livello nazionale e internazionale. È in fase di definizione la sperimentazione di soluzioni tecnologiche e progettuali sviluppate all'interno del Comune di Stregna, grazie a un accordo di ricerca attivato con la Escuela Superior de Arquitectura y Diseño, dell'Universidad de Morón a Buenos Aires.

Nell'ambito dell'Università argentina è attivo un Laboratorio di progettazione che prevede la realizzazione di manufatti architettonici prefabbricati all'interno di un'officina interna. Questo costituisce un aspetto importante perché permette di vedere realizzati gli esiti di simili progetti di ricerca, pratica che l'UniMorón estende anche alle Tesi di laurea facendo realizzare agli studenti almeno una parte delle architetture progettate in scala reale. In questo senso per esempio, lo scambio avvenuto con l'Università argentina è stata un'occasione per evidenziare criticità nei metodi didattici propri del contesto italiano.

Di contro, lo studio sulle architetture modulari effettuato nei territori fragili del nord-est italiano diventa la base per implementare anche una ricerca in corso a Buenos Aires, che ha come obiettivo la realizzazione di architetture di emergenza, prefabbricate e in legno, realizzate nell'area metropolitana di Buenos Aires. L'accordo di ricerca prevederà un periodo di mobilità da parte di alcuni docenti italiani presso la sede universitaria di Buenos Aires dove, previa individuazione dei fondi necessari, si procederà alla realizzazione di una delle architetture modulari elaborate, scelta in accordo con i referenti argentini.

Un'ulteriore occasione di sviluppo della presente ricerca è costituita dalla condivisione delle fasi all'interno del lavoro coordinato dal consorzio iNEST, al quale aderiscono l'Università IUAV di Venezia e l'Università di Udine, con lo scopo di spe-

rimentare, attraverso un approccio integrato, soluzioni per il miglioramento delle attività di trasformazione funzionale, prestazionale e ambientale dell'architettura e del territorio, promuovendo pratiche di progettazione e trasformazione dell'ambiente costruito, con possibili applicazioni nel settore delle costruzioni che rappresenta uno degli attori coinvolti all'interno del consorzio. In questo contesto l'Università di Udine ha individuato come principale area di ricerca i territori marginali (al di sopra dei quattrocento metri s.l.m.) che presentano caratteristiche geografiche e ambientali simili, nonché aspetti di criticità sismica e socio-economica e l'area delle Valli del Natisone costituisce uno dei progetti pilota inseriti nel research topic. La rigenerazione in chiave sostenibile dei territori fragili attraverso l'utilizzo delle architetture modulari adattive, presentata in questo contributo, costituisce una delle metodologie progettuali esplorate all'interno del consorzio iNEST, finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU.

Considering the extensive work carried out by the Agency for Territorial Cohesion within the National Strategy for Inner Areas – SNAI (DPC, 2014), this essay attempts to develop a regeneration methodology that, through a multidisciplinary approach at the territorial and architectural scale, proposes a new compositional archetype based on the use of an adaptive architectural module. The hypothesis finds a starting point in the framework of the Bando Borghi, a public notice aimed at promoting projects for the regeneration of the heritage of villages (Ministero della Cultura, 2022), and in the activities promoted by the iNEST Consortium – Interconnected Northeast Innovation Ecosystem¹, a new model of innovation ecosystem consisting of a network of Universities, research organisations and public and private entities.

The reference area is made up of an articulated system of small Municipalities (Figg. 1, 2), often far from essential services related to education, health and mobility but occupying almost 60% of the national territory in which less than 25% of the population resides (De Rossi, 2018). These areas can be considered real laboratories of experimentation to define possible development models becoming examples to be adopted in other territorial contexts as well (Carrosio, 2019), assuming that issues related to fragile territories impose the identification and strengthening of local potentials (Boi et alii, 2018; Dall'Ara and Villani, 2020; Baró Zarzo, Poyatos Sebastián and Martínez Martínez, 2020; Brignoni et alii, 2023) and recognising the role that places at the margin can take on in fostering the transition to new models of development (Galderisi, 2023).

The data provided by ISTAT (2022) highlight how, in these territories, the population decrease is more pronounced than the national average and constitutes a complex and strategic issue for preserving villages and large portions of the country. Starting from these traces, we hypothesise the application of a research methodology that seeks to formulate exploratory projects of regeneration by referring to transdisciplinary looks to read, understand and consequently design with waste, with rejected, marginal and abandoned places; this is necessary to search among the folds of knowl-

edge, to welcome transversal looks that reason in the field of art or science (Marini, 2010).

We hypothesise a design choice that starts from a module as the generating principle of the project. The architectural choice stands without pre-established functions, allowing to anticipate, verify and accelerate regeneration processes in multiple spatial contexts, operating on rhythms and juxtapositions (Viganò, 1999). In this way, such a design form could also become a useful tool for public administrations in defining and developing targeted regeneration policies.

The proposed methodology starts from a territorial analysis of the reference context, some rural towns characterised by depopulation phenomena, and then declines to the scale of the architectural project, materialising in an experimental practice of reuse of architectural and urban artefacts, operating directly on the pre-existences. The exploration rearticulates the main themes of the debate of the disciplinary fields (urban planning and architectural composition), focusing on indeterminacy as a principle that allows anticipating regenerative processes and on the potential of using modular architectures.

The case studies are part of the experiments conducted in the Municipality of Stregna, a village in the Natisone Valleys along the eastern hilly strip of the Province of Udine, also taking into account some international cases. The reflection envisages an overall reformulation in terms of management, including energy and environmental management, of many technological aspects pertaining to both the territorial and building scales. Particular attention is paid to economic sustainability, in terms of direct and indirect costs, from the construction site to the management of the architectural process, according to paradigms proper to reuse, recovery, and recycling of materials in respect of the material and immaterial values that hamlets as urban and architectural facts express, in the precise awareness that every abandonment entails a reconstruction and every disappearance opens to new presences (Teti, 2004).

Identifying the features of territorial structures in the new millennium | Isolating the specific characters of a territory requires a strategy of attention that requires imagining a restitution process capable of achieving an incisive selection of themes, issues and objects. It is a process of reconstruction that occurs only apparently unsystematically, starting with some places, issues or instances and leaving others in the background.

Defining territorial characters means imagining maps and restitutions that claim to select elements capable of restoring a territorial structure or system (Fig. 3), made up of relationships and exceptions that can find opportunities for scalability, resulting in ideas and domains capable of crossing individual disciplines. The term structure is understood in the meaning ascribable both to the conceptually simpler level, as a mechanism of operation, and to the more complex one, in this case as 'frame' (Secchi and Merlini, 1992) or again as conceptual organisation within images, strategies, scenarios for space and time that define an ecology of the gaze typical of the Gibsonian School, capable of highlighting how the subject and the object of view are one in function of the other (Lanzani, 2022).

The territory of Italian boroughs needs to build a thematic subject in which design exploration (sometimes understood as a disciplinary contribution, other times as a professional outcome) can be guided toward clear and shared goals, especially in close relation to the themes of resources (human and energy), natural capital (Schumacher, 2011) and ecosystem services (Scalisi and Ness, 2022; Lombardini, Pilogallo and Tucci, 2023).

If urban and architectural forms translate with increasing emphasis into issues of sustainability, ideas of social equality, and new forms of governance and comfort, with often multifaceted outcomes, the question remains as to how that design can address issues such as foresight and durability. It is undoubtedly an ontological question that arises today, involving Urbanism as much as Architecture (as well as many other disciplines), and puts back at the centre a situation of general crisis now of increasingly enduring character. Metaphorically, the situation harks back to the famous Vitruvian scheme taken up by Abbé Laugier (1755; Fig. 4) in which architecture personified by a young maiden seated on classical ruins, points out to a child (the personification of humanity) a primitive hut utterly free of defects and imperfections, different and free from archetypes and interpretable as the generating nucleus of all architecture (Biraghi, 2021).

Perhaps part of this is the suggestion that a starting module, repeatable and scalable, may be necessary for the reconceptualisation and construction of a space, such as that of the boroughs, that is internal to multiple natures (Banham, 2009; Hunt, 2004), often different from each other, understood in an environmental-productive and ecological sense. Laugier's iconographic metaphor reaffirms an awareness of being within an epochal epistemological shift – as then from Baroque to Neoclassicism – which involves not only the more established forms of space, now constituted by a building surplus, but also economies, practices and the very maintenance of resources essential to survival. In this, recomposing the metaphor in the diachronic form today, with respect to the issues of ecological transition, to that child (the personification of humanity) architecture would perhaps indicate to start again from an immense expanse of ruins that are very heterogeneous from one another.

The module as a design device for transition

The ecological transition as a specific design season is not yet properly determined in the full Anthropocene period (Plevani and Varotto, 2021), and the role to be played by disciplines related to architecture and urbanism calls for the distribution of new theoretical horizons as well as new devices and tools. Therein lies the hypothesis of this contribution, which consists in recognising how the predetermination of certain design forms, defined from territorial specificities, fall within the definition and design of basic modules. The design of the module, its measurement and definition, including in terms of materials, within forms that are coherent and appropriate to the new conditions, are intertwined with the issues of indeterminacy inherent in the ecological transition.

These are certainly not theoretical remnants of a modernist tradition, defined by a top-down approach and integral control over space, as much



Fig. 5 | View of Mersino, the hamlet of Pulfero, Udine Province (credit: the Authors, 2022).

Fig. 6 | View of Stregna, Udine Province (credit: the Authors, 2022).

as opportunities offered by a new period of physical space design. For this reason, the module is associated with a keyword such as a device (Agamben, 2007), that is, as a set of systems, issues, methods, normative contributions, practices, and forms of land management, but above all, spatial rationalities.

The form, in this case, hinges in a different philosophical framework than in the past, at the opposite of broad gazes, of denunciation, compassion and indignation (Bianchetti, 2011) to make room for robust strategic roles at the intersection of knowledge and functions that are less and less circumscribable according to rationalist logics but increasingly projected towards possible 'becoming'. Therein lies the novelty in the use of this Foucauldian-derived term (Foucault, 2016), which discusses the very role of the design outcome. Moreover, in the frame of an ecological transition with characters increasingly markedly linked not so much to intentions but to timing, the horizon set seems to be changing (Mantziaras, 2020); in fact, if the United Nations speaks of 2030 (UN – General Assembly, 2015) and the European Union of 2050 (European Commission, 2018) in this time gap the project of the transition in some contexts appears increasingly evanescent, deprived of spatial, technological and social values where the future may seem an infinite horizon.

In many Italian contexts, particularly in inland areas and in so many underutilised and abandoned places (this is the case in some mountain and foothill villages), a transition project seems to be unable to highlight its characters immediately. For this reason, it seems appropriate to emphasise at least two points.



Fig. 7 | Recurrent typology in the Natisone Valleys: Rodda, the hamlet of Pulfero, Udine Province (credit: the Authors, 2022).

Fig. 8 | Detail of traditional wooden roofing (credit: the Authors, 2022).

Fig. 9 | Local stone used in buildings and terracing (credit: the Authors, 2022).

In the first instance, it should be kept in mind that spatial representations have a particular relevance, today more than yesterday since they concern a space-environment that is common not only to all human beings but to the whole of living beings and their territorial aggregations of various levels (Dematteis, 2021). The complexity of contemporary space is very high, and defining the functioning structures remains, in many ways, outside the skills and knowledge of those who actually produce the project; the degree of indeterminacy, therefore, should be controlled and argued precisely to make sure that variations in practices, uses or environmental conditions can satisfactorily respond to futuristic needs (de Jouvenel, 1967).

Thus, the project cannot be limited to defining a space of one's life but is the selective act that directs toward connections of facts and aspects relevant to each other. Relevant means those material manifestations whose appearances are capable of evoking at the same time the objective characters of phenomena (those belonging to different disciplines) and the subjectivity of their economic, social, cultural, political, as well as ideological, ethical and aesthetic meanings (from here we can refer to recent policies of the Agency for Social Cohesion for the development and support of enterprises operating in inland areas and hamlets). In this way, starting from a basic form means

openly adopting an elementary language of things that guides becoming in a simplified way.

Such a complex system of material and immaterial relations refers to the metaphorical role of the module, which is, at the same time, something more specific and complex than a situated architectural component. The module becomes an instrument of composition and intervention on a territorial scale, capable of generating landscapes in a wide and constantly implementable network of meanings, a challenging element for those who engage in the complex art of designing and governing space (Gambino, 1997).

The second point concerns the possible relationships that the module, understood as a generating element, can establish at the territorial and point scale. In other words, the module takes up, on the one hand, both horizontal relations (of exchange and communication between different parts of the territory and other places) and vertical relations (between the events of a given place and the cultural substrate. Thus, the module becomes the bearer of a kind of implicit project (Viganò, 2017) that is expressed and represented with different tools, which vary from time to time in the hierarchies, geometries and design of the constituent materials of the street grid, defining significant places, distributing urban equipment, allowing for the re-discussion of norms that can regulate in

more or less detailed ways building possibilities and property rights (as, for example, in the Municipalities of the Natisone Valleys; Figg. 5, 6), but also the relationships between solids and voids, between public and private space, and distances between volumes.

The module, therefore, becomes not only an analytical-interpretive tool but also a normative processual contribution to spatial and architectural sciences within an increasingly globalised cultural framework that necessarily has to come to terms with vertical relationships, particularly on the mutual interaction between living beings and the environment, between society and the biosphere in which the combination of overlap and penetrability emerges as a principle for essential actions imposed by a new climate regime (Latour, 2020) without which it is easy to fall back into uninnovative modes.

Such a project would address immediate and future needs, sometimes filling gaps not only in imagination but also in management, both on a public and private scale, providing control in terms of resource consumption and inducing more interpretive approaches to market phenomena (Schön, 1993). The current trend reveals specific scenarios that unequivocally declare the urgency of abandoning expansive logics in favour of a more general reduction of resources. Above all, there remains

an issue of offsetting that will touch crucially on human activities and collective practices where it must be established what the direct and indirect effects of each activity will be in terms of CO₂ emissions into the atmosphere. Hence, the transition project will again be measured within very concrete forms and parameters that will have to be shared by social and economic, as well as cultural and political forces.

Programmatic indeterminacy as a compositional principle | In rereading the various experiments that have taken place in recent years as attempts to regenerate marginal areas, themes such as tourism, cooperation, and smart working are recalled in a broad panorama of possible ways forward to give value to the architecture of these places (Cucinella, 2018). Some experiences promptly show that they have generated positive changes, but it is complex to conduct abstractions with respect to the specific context to define good practices. Starting from this condition of uncertainty, we want to try to characterise interventions on the built heritage by untying themselves from the strictly functional issues that a given hamlet may assume by strategically neglecting the use of the individual building.

Contemporaneity is characterised by constant uncertainties caused by environmental, economic and migratory crises (Carrosio, 2019), but more generally, according to Ippolito (2019), it seems that in Italy, some quantities are making the quality of landscapes, and a multitude of materials, dynamics and subjects singularly not always relevant but cumulatively incisive are producing phenomena of construction and modification. This condition, which has all the appearance of a negative phenomenon, can become an opportunity to de-

fine a new paradigm of doing architecture in regeneration processes: according to Steven Holl (2004), the restlessness of programmatic fluctuation can be interpreted as an advantage; the solution to internal indeterminacy will be the proliferation of structures with an articulated skin.

It opens up the possibility of adopting a methodology that involves design activity conditioned by uncertainty such that multiple functions can be assumed for a given building, defining an outcome marked by 'a conscious programmatic richness' (Holl, 2004). It involves rethinking a way of imagining oneself in space regardless of the actions that will take place in that space, taking into account the fact that, according to Koolhaas (2001), a project cannot predict the cracks that will open up in the future because it describes an ideal state to which one can only approximate.

In defining the design choices of interventions for the reuse of the built heritage present in fragile territories, it should be considered that each building must take note of the existing external systems, even if these can actually be considered as parts of a future absolute order thought of as continuous and capable of accepting growth and change (Eisenman, 2014). This point of view values design choices that seek to find values in absolute terms and not because of issues related to individual specificities, thus favouring the development of projects that carry universal sustainability principles and accessibility in full compliance with the 2030 Sustainable Development Goals (UN, 2015).

Adaptive modular architectures | The use of the module defines the core of the design methodology and is the starting point for the development of the experimental process. This process adopts modular architectures with both the formal and

structural aspects that define the architectural artefact in mind and the search for the highest quality levels of energy efficiency, technological innovation, adaptability and, more generally, sustainability.

The first phase involves an operation of re-reading the significant components of the existing artefacts to offer an analysis aimed at understanding the elements of specific typological connotation (Fig. 7). According to Zevi (1973), this operation of disaggregation into the individual compositional elements of the architectural artefact is built on the idea that the list disintegrates the block, enumerates the elements without classifying them, resemantises them in the specific 'datitude' and proportional sequences; the successive invariants corroborate the list by undoing the taboos of symmetry, of geometric tracings, of perspective systems, by breaking down the volume into slabs, by freeing its angles on the structural plane, by temporalising space; still, in so doing, they stimulate a reintegration of the listed elements.

Decomposition and subsequent reintegration are concepts underlying the methodology applied to define the design module to be adopted in regeneration processes for architectural heritage but it is only when considerations of intent and function become operational that the size of modules can be determined not only in terms of structural economy, but also in terms of the scale suitable to accommodate the maximum number of specific functions envisaged (Eisenman, 2014). This is what has happened in some recent experiments in the Paris metropolitan region through the public-private partnership initiative, Toits Temporaires Urbains (2019-2023), which has created a modular system of temporary residences, designed in terms of comfort and energy perfor-

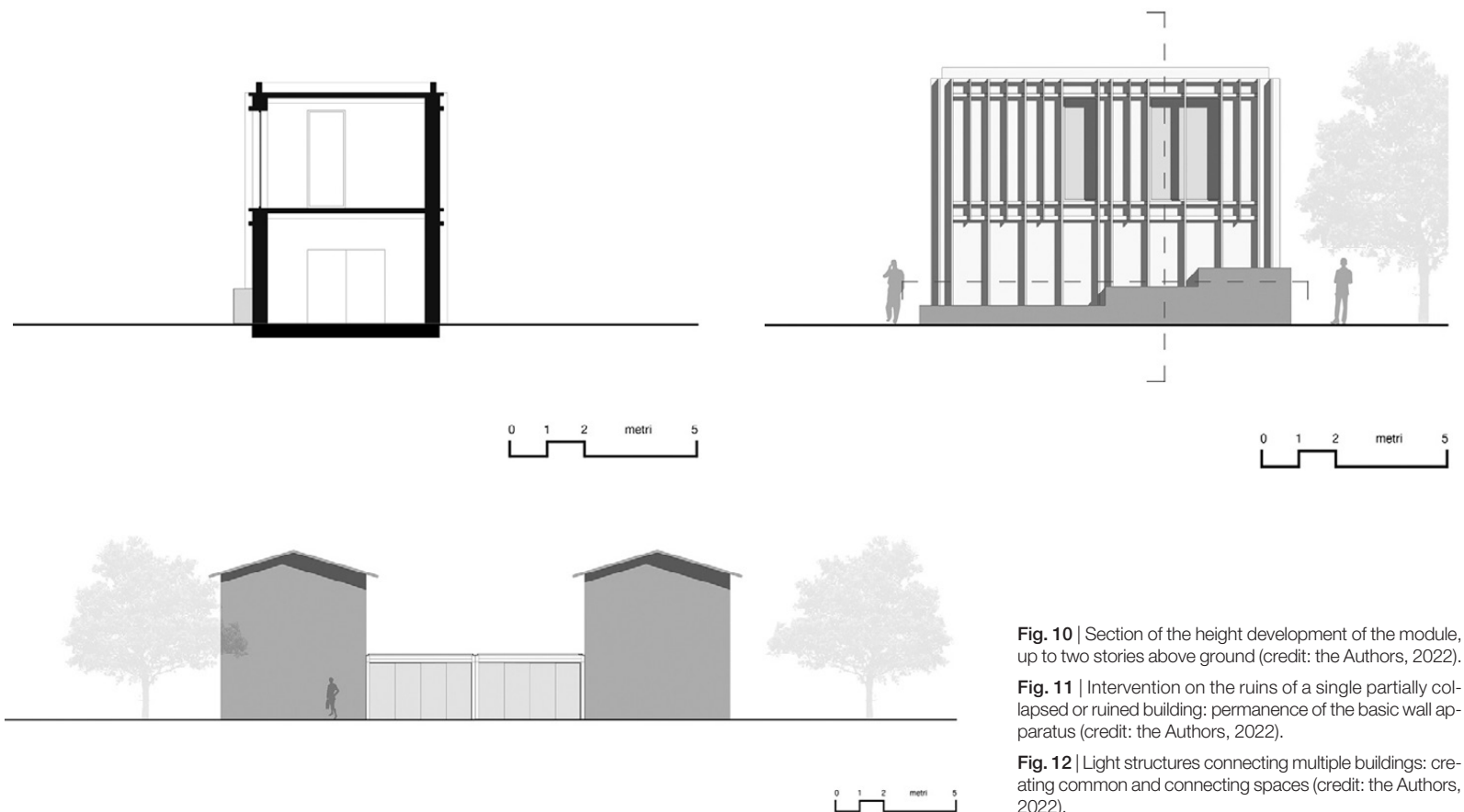


Fig. 10 | Section of the height development of the module, up to two stories above ground (credit: the Authors, 2022).

Fig. 11 | Intervention on the ruins of a single partially collapsed or ruined building: permanence of the basic wall apparatus (credit: the Authors, 2022).

Fig. 12 | Light structures connecting multiple buildings: creating common and connecting spaces (credit: the Authors, 2022).



Fig. 13 | Terraces in the Municipality of Stregna, Udine Province (credit: the Authors, 2022).

Fig. 14 | Buildings subject to possible intervention in Montefosca, hamlet of Pulfero, Udine Province (credit: the Authors, 2022).

Fig. 15 | Buildings subject to possible intervention in Stregna, Udine Province (credit: the Authors, 2022).

mance, capable of being installed in residual urban spaces and able to exert attractiveness in marginal places. It is, therefore, hypothesised to apply these concepts in some villages in northeastern Italy that have suffered the most intense phenomena of depopulation, coinciding with the area of the Natisone Valleys. The area in question is characterised by water springs, defined by traditional terracing (now recognised as identity elements), a massive presence of continuously growing forested areas, and areas of marked biodiversity (Regione Friuli-Venezia Giulia, 2018). The Municipality of Stregna represents the case study where the new architectures, the outcome of this research, seek to demonstrate their potential. Starting from the typological analysis of the buildings present within the village, the shape and size of the module that defines the different artefacts are identified. The phase of surveying and subsequent re-reading of the pre-existing buildings constitutes a funda-

mental moment of the research, not only because it allows the formal and dimensional aspects to be defined, but also because of the contribution it makes to the study of materials, identifying wood (Fig. 8) and stone as the main components of the buildings (Fig. 9).

The outcome of the initial study phase makes it possible to define the basic regeneration module and draws an artefact with a ten-by-six-meter floor plan that grows in height to two stories above ground (Fig. 10). This module is the starting point from which to extrapolate all the subsequent elaborations that will be formulated and that have generated hundreds of design solutions for building rehabilitation. The application hypotheses of the modular architectures are subsequently divided based on well-defined criteria.

The first classification divides the projects into two categories: 1) intervention on ruins – on single buildings, partially collapsed or in ruins, of which the masonry or roofing apparatus remains (Fig. 11); 2) construction of macrostructures between several buildings – light structures connecting or functional to several buildings with the purpose of creating common and connecting spaces (Fig. 12). The same module adapts, aggregates, is broken down and recomposed, in the process of transition of public and private, collective or intimate spaces. Finally, an articulate classification work offers a series of representations of the design solutions, intentionally in indicative, synthetic and diagrammatic form, precisely in response to the highly differentiated and uneven building fabric.

Critical issues and future scenarios | The research objectives fall under the use of the module concept that underlies the entire regenerative process. Using a repeatable and adaptable architectural module, in single or aggregated form, holding several modules together with each other, and breaking down the existing urban fabric by recomposing it into new forms according to a mediating role between public and private space are operations that bring out the image of a renewed compositional archetype. The outcome is a project that tries to redesign the landscape, for example, through the recovery of terracing (Fig. 13), to redefine open spaces, redefining the boundaries between public and private, or even to re-functionalize the buildings of the hamlet (Figs. 14, 15), integrating ‘parasitic’ design practices through the insertion of new architectural elements into pre-existing buildings (Marini, 2015).

This approach appears as yet unexplored for managing the vast abandoned and neglected heritage, as it can offer public administrations and local stakeholders practical tools for proactive management of regenerative processes. The indeterminacy of architectures becomes a strength, regardless of the function that individual buildings will take on, opening up the initiation of processes that can reduce design timelines and deferring to a later stage the designer’s investigation of individual specificities. Too often, small Municipalities find themselves unprepared and lacking adequate tools to access the various funding calls aimed at them, and this hypothesis can become support for the definition of repeatable solutions in different contexts.

The methodology, given the nature of solid modification of the possible artefacts involved,

may encounter strong resistance in its diffusion, especially from a common feeling, linked to a picturesque interpretation of the village, functional to the evocation of atmospheres and conviviality, in total contrast to possible even more radical transformations for these spaces. Within the framework of such operations, regenerative processes should open up not only to functions of a touristic nature but, above all, should seek to make habitable even places that are not particularly attractive or that do not fall into ‘aestheticising categories’ (Barbera, Cerosino and De Rossi, 2022). Without prejudice to an approach related to philological conservation and restoration, as far as valuable and constrained assets are concerned, the contribution hypothesis hopes for a more selective approach on the built environment, hypothesising that in some contexts modular modifications can integrate with forms of building prescription and constraint, supporting the reactivation of communities and productions, setting the conditions for a more contemporary and systemic adaptation.

The sharing of the design strategies developed can be an example of good practices to be replicated in contexts other than those where the experimentation was developed, generating possible interest at the national and international levels. The experimentation of technological and design solutions developed within the Municipality of Stregna is being defined, thanks to a research agreement activated with the Escuela Superior de Arquitectura y Diseño of the Universidad de Morón in Buenos Aires.

As part of the Argentine University, a Design Laboratory is active, which involves the creation of prefabricated architectural artefacts within an in-house workshop. This constitutes an essential aspect because it makes it possible to see the outcomes of similar research projects realised, a practice that UniMorón also extends to the Theses by having students realise at least part of the designed architecture in full scale. In this sense, for example, the exchange with the Argentine University was an opportunity to highlight criticalities in the teaching methods peculiar to the Italian context. Conversely, the study on modular architectures carried out in the fragile territories of northeastern Italy becomes the basis for also implementing research underway in Buenos Aires, which aims at the realisation of emergency, prefabricated and wooden architectures built in the metropolitan area of Buenos Aires. The research agreement will include a period of mobility by some Italian professors at the Buenos Aires University campus where, subject to the identification of the necessary funds, they will proceed to the realisation of one of the elaborated modular architectures, chosen in agreement with the Argentine referents.

A further opportunity for the development of the present research is provided by the sharing of phases within the work coordinated by the iNEST consortium (to which the IUAV University of Venice and the University of Udine adhere) to experiment – through an integrated approach – solutions for the improvement of functional, performance and environmental transformation activities of architecture and the territory, promoting practices of design and transformation of the built environment, with possible applications in the construction sector, which represents one of the actors involved

within the consortium. In this context, the University of Udine has identified as its leading research area the marginal territories (above four hundred meters above sea level) that present similar geographical and environmental characteristics, as

Acknowledgements

This paper is the result of a shared reflection by the Authors. Nevertheless, the paragraphs ‘Identifying the features of territorial structures in the new millennium’ and ‘The module as a design device for transition’ should be attributed to L. Velo, while the introductory paragraph and the paragraphs ‘Programmatic indeterminacy as a compositional principle’, ‘Adaptive modular architectures’, and ‘Critical issues and future scenarios’ should be attributed to A. Cervasato. This research and the APC were funded by RFF NextGenEU, grant number ECS00000043 – CUP G23C22001130006, through the Italian Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), Mission 4 «Education and Research», Component 2, Investment 1.5, Interconnected Nord-Est Innovation (iNEST) Ecosystem, Spoke 4 (research coordinator: L. Fabian).

Notes

1) More information about iNEST can be found at: consortiuminest.co.uk [Accessed 11 October 2023].

References

- Agamben, G. (2007), *Il Regno e la Gloria – Per una genealogia teologica dell'economia e del governo*, Neri Pozza Editore, Vicenza.
- Banham, R. (2009), *Los Angeles – The Architecture of Four Ecologies*, University of California, Berkeley.
- Barbera, F., Cerosino, D. and De Rossi, A. (eds) (2022), *Contro i borghi – Il Belpaese che dimentica i paesi*, Donzelli Editore, Roma.
- Baró Zarzo, J.-L., Poyatos Sebastián, J. and Martínez Martínez, N. (2020), “Contrastare lo spopolamento nell'entroterra della Spagna – Proposte tra Arte, Design e Architettura | Fighting against depopulation in inland Spain – Alternatives from Art, Design and Architecture”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 8, pp. 138-147. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8132020 [Accessed 11 October 2023].
- Bianchetti, C. (2011), *Il Novecento è davvero finito – Considerazioni sull'Urbanistica*, Donzelli Editore, Roma.
- Biraghi, M. (2021), *Questa è Architettura – Il progetto come filosofia della prassi*, Einaudi, Milano.
- Boi, G., Camocini, B., Daglio, L., Mazzarello, M. and Podda, R. (2018), “Restart Oliena 2018 – Strategie temporanee per una rigenerazione permanente | Restart Oliena 2018 – Temporary strategies for a permanent regeneration”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 4, pp. 227-234. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/4282018 [Accessed 11 October 2023].
- Brignoni, M., Dall'Osso, G., Gasparotto, S. and Varini, R. (2023), “Mappatura dei processi design-driven per la rigenerazione delle piccole città fortificate in aree interne | Mapping design-driven processes for the regeneration of small fortified towns in inland areas”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 281-290. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13242023 [Accessed 11 October 2023].
- Carrosio, G. (2019), *I margini al centro – L'Italia delle aree interne tra fragilità e innovazione*, Donzelli, Roma.
- Cucinella, M. (ed.) (2018), *Arcipelago Italia – Progetti per il futuro dei territori interni del Paese – Padiglione Italia alla Biennale Architettura 2018*, Quodlibet, Macerata.
- Dall'Ara, G. and Villani, T. (2020), “Per un futuro sostenibile dei borghi – Albergo Diffuso e nuovi scenari di rigenerazione | A sustainable future for hamlets – Albergo Diffuso and new regeneration scenarios”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 8, pp. 230-243. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8222020 [Accessed 11 October 2023].
- de Jouvenel, B. (1967), *L'arte della congettura*, Vallecchi, Firenze.
- De Rossi, A. (ed.) (2018), *Riabitare l'Italia – Le aree interne tra abbandoni e riconquiste*, Donzelli, Roma.
- Dematteis, G. (2021), *Geografia come immaginazione – Tra piacere della scoperta e ricerca di futuri possibili*, Donzelli, Roma.
- DPC – Dipartimento Politiche di Coesione (2014), *Strategia Nazionale Aree Interne – Definizione, obiettivi, strumenti e governance – Accordo di partenariato 2014-2020*. [Online] Available at: miur.gov.it/documents/20182/890263/strategia_nazionale_aree_interne.pdf/d10fc111-65c0-4acd-b253-63efae626b19 [Accessed 11 October 2023].
- Eisenman, P. (2014), *Inside out – Scritti 1963-1988*, Quodlibet, Macerata.
- European Commission (2018), *The Commission calls for a climate neutral Europe by 2050*. [Online] Available at: ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_18_6543 [Accessed 11 October 2023].
- Foucault, M. (2016), *Le parole e le cose – Un'archeologia delle scienze umane*, BUR, Milano.
- Galderisi, A. (2023), *Riabitare i paesi – Strategie operative per la valorizzazione e la resilienza delle aree interne*, LetteraVentidue, Siracusa.
- Gambino, R. (1997), *Conservare, Innovare – Paesaggio ambiente territorio*, UTET, Torino.
- Holl, S. (2004), *Parallax – Architettura e percezione*, Postmedia, Milano.
- Hunt, J. D. (2004), *The Afterlife of Gardens*, The University of Chicago Press, Chicago.
- Ippolito, F. (2019), *Paesaggi frantumati – Atlante d'Italia in numeri*, Skira, Milano.
- ISTAT – Istituto Nazionale di Statistica (2022), *La Geografia delle Aree Interne nel 2020 – Vasti territori tra potenzialità e debolezze*. [Online] Available at: istat.it/it/files/2022/07/FOCUS-AREE-INTERNE-2021.pdf [Accessed 11 October 2023].
- Koolhaas, R. (2001), *Delirious New York – Un manifesto retroattivo per Manhattan*, Electa, Milano.
- Lanzani, A. (2022), *Cultura e progetto del territorio e della città – Una introduzione*, FrancoAngeli, Milano.
- Latour, B. (2020), *La sfida di Gaia – Il nuovo regime climatico*, Meltemi, Milano.
- Laugier, M. A. (1755), *Essai sur l'Architecture – Nouvelle édition, revue, corrigée, & augmentée, avec un dictionnaire des termes et des planches qui en facilitent l'explication*, Paris.
- Lombardini, G., Pilogallo, A. and Tucci, T. (2023), “Innovazione rurale, servizi eco-sistemici e processi di urbanizzazione in Liguria, tra costa ed entroterra | Rural innovation, ecosystem services and urbanisation processes in Liguria, between coastal and inner areas”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 205-216. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13172023 [Accessed 11 October 2023].
- Mantziaras, P. (2020), “La transition écologique par le projet architectural, urbain et paysager”, in Declève, B., de Lestrangé, R., Gallezot, H. and Mantziaras, P. (eds), *Dessiner la transition – Dispositifs pour une métropole écologique*, MétisPresses, Ginevra, pp. 19-42.
- Marini, S. (2015), *Architettura parassita – Strategie di riciclaggio per la città*, Quodlibet, Macerata.
- Marini, S. (2010), *Nuove terre – Architetture e paesaggi dello scarto*, Quodlibet, Macerata.
- Ministero della Cultura (2022), *Avviso pubblico per la presentazione di Proposte di intervento per la rigenerazione culturale e sociale dei piccoli borghi storici da finanziare nell'ambito del PNRR, Missione 1 – Digitalizzazione, innovazione, competitività e cultura, Component 3 – Cultura 4.0 (M1C3), Misura 2 ‘Rigenerazione di piccoli siti culturali, patrimonio culturale, religioso e rurale’, Investimento 2.1 ‘Attrattività dei borghi storici’, finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU*. [Online] Available at: pnr.cultura.gov.it/wp-content/uploads/2022/05/Avviso-Borghi-LineaB-20.12.21.pdf [Accessed 11 October 2023].
- Plevani, T. and Varotto, M. (2021), *Viaggio nell'Italia dell'Antropocene – La geografia visionaria del nostro futuro*, Aboca, Sansepolcro (AR).
- Regione Friuli-Venezia Giulia (2018), *PPR – Piano Paesaggistico Regionale*. [Online] Available at: regione.fvg.it/rafv/cms/RAFVG/ambiente-territorio/pianificazione-gestione-territorio/FOGLIA21/ [Accessed 11 October 2023].
- Scalisi, F. and Ness, D. (2022), “Simbiosi tra vegetazione e costruito – Un approccio olistico, sistemico e multilivello | Symbiosis of greenery with built form – A holistic, systems, multi-level approach”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 26-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1122022 [Accessed 11 October 2023].
- Schön, D. A. (1993), *Il professionista riflessivo – Per una nuova epistemologia della pratica professionale*, Dedalo, Bari.
- Schumacher, E. F. (2011), *Piccolo è bello – Uno studio di economia come se la gente contasse qualcosa*, Mursia, Milano.
- Secchi, B. and Merlini, C. (eds) (1992), *Un Progetto per Siena – Il Concorso per Piazza Matteotti-La Lizza*, Electa, Milano.
- Teti, V. (2004), *Il senso dei luoghi – Memoria e storia dei paesi abbandonati*, Donzelli Editore, Roma.
- UN – General Assembly (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 11 October 2023].
- Viganò, P. (2017), “Un progetto per Prato – Un manuale implicito”, in Renzoni, C. and Tosi, M. C. (eds), *Bernardo Secchi – Libri e Piani*, Officina Edizioni, Roma, pp. 101-114.
- Viganò, P. (1999), *La città elementare*, Skira, Milano.
- Zevi, B. (1973), *Il linguaggio moderno dell'architettura – Guida al codice anticlassico*, Einaudi, Torino.

ARTICLE INFO

Received	11 September 2023
Revised	12 October 2023
Accepted	27 October 2023
Published	31 December 2023

OLTRE L'ARRIVO

Potenzialità e criticità della modularità nei rifugi e negli alloggi per gli sfollati

BEYOND ARRIVAL

On the potential and shortcomings of modularity in shelter and housing for the displaced

Yona Catrina Schreyer

ABSTRACT

L'architettura può essere un riflesso tangibile di eventi contemporanei significativi, offrendo un'idea di come gli architetti rispondano alle sfide che si presentano. In particolare, in circostanze estreme che richiedono interventi rapidi, come ad esempio l'improvviso aumento della domanda di alloggi dopo un disastro, la modularità risulta funzionale per il suo potenziale di razionalizzazione e scalabilità. L'articolo esplora come il modulo – inteso sia come idea progettuale che come metodo costruttivo – può offrire risposte immediate per accogliere grandi gruppi di persone in momenti di improvvise migrazioni di massa, discute le criticità e i limiti della modularità, come durata o materialità, riflette criticamente sui moduli abitativi standardizzati e si interroga sulla mancanza di politiche adeguate in presenza della pressante necessità di aumentare il numero di alloggi permanenti.

Architecture comes to be a tangible reflection of significant contemporary events, offering insight into how designers respond to the challenges at hand. Particularly amid extreme circumstances necessitating swift spatial interventions, such as the sudden surge in demand for housing after a disaster, modularity appeals due to its potential for streamlining and scalability. This article explores how the module – both as a design concept and a construction method – can facilitate immediate design responses to accommodate large groups of people during sudden mass migration. It discusses the weaknesses of modularity, such as duration or materiality, critically reflects on standardised living modules, and questions a lack of urban stimulus amid the pressing need for increased permanent housing stock.

KEYWORDS

architettura modulare, progettazione nell'incertezza, alloggi di emergenza, standard abitativi, migrazione

adequate housing, migration, module architecture, design amid uncertainty, accommodation in emergency



Yona Catrina Schreyer is a PhD Candidate at the Department of Architecture and Urban Studies of the Polytechnic University in Milan (Italy). She studied Architecture in Munich, Milan, and Ahmedabad and has taught and researched at various international institutions such as the University of Applied Arts Vienna, the Technical University of Munich, and the United Nations Human Settlement Programme in New York. Through her current projects, she engages with the relationship between society, the design of the built environment, and political programmes, focusing on spatial and ethical implications for the role of architects in addressing phenomena such as mass movement and digitisation. E-mail: yonacatrina.schreyer@polimi.it

L'architettura è espressione dell'evoluzione dell'umanità, in quanto agisce per trasformare lo spazio affrontando le sfide imposte da eventi critici attraverso soluzioni architettoniche che offrono spunti di riflessione sulla complessa varietà di fattori coinvolti. La modularità, in tale ottica, può affrontare specifiche criticità che richiedono efficienza in termini di tempo e di economia, di adattabilità e di scalabilità (Anderson and Anderson, 2006), sia nella pianificazione di insediamenti permanenti che in quelli di emergenza. Come in altre strutture espressione di momenti geopolitici significativi (Parsloe, 2020), l'approccio pragmatico modulare negli alloggi di massa ha dimostrato la sua validità quando si debbano accogliere numerosi gruppi di persone che arrivano tutte nello stesso momento.

La mobilità e il tempo giocano un ruolo cruciale nella progettazione dell'emergenza; infatti se la lentezza propria dell'architettura, scandita dai processi normativi e costruttivi, è in netto contrasto con la natura rapida e imprevedibile di eventi della contemporaneità (Schön, 1973), la mobilità è un aspetto fondamentale della nostra esistenza (Cresswell, 2006) in quanto i flussi migratori – guidati dalla ricerca di migliori condizioni di vita, per scelta o per necessità – sono strettamente legati alla questione dell'alloggio nel luogo di arrivo (Harari, 2018). Di fronte a una popolazione globale in crescita, a condizioni climatiche mutevoli e a un numero senza precedenti di migranti (IOM, 2021), riconsiderare il 'rifugio' e l'alloggio attraverso la lentezza della modularità diventa imperativo per rispondere all'Obiettivo 11 delle Nazioni Unite che sancisce il diritto umano fondamentale a un alloggio adeguato (UN General Assembly, 2015). Per il 2030 le Nazioni Unite prevedono che 3 miliardi di persone, ovvero circa il 40% della popolazione mondiale, avrà bisogno di un alloggio adeguato e a prezzi accessibili, aggiungendosi in modo significativo agli oltre 100 milioni di sfollati oggi (UN-Habitat, 2015).

A fronte di ciò il presente contributo si propone di esplorare il potenziale architettonico del modulo affrontando le sfide imposte dalla pressante domanda abitativa, per la quale tempo e materiali sono fattori critici. La riflessione si fonda sulla disamina della teoria progettuale del modulo e sul suo impatto nella definizione degli standard abitativi; in seguito vengono forniti esempi di pratiche e sperimentazioni evidenziandone le potenzialità e analizzando come diversi approcci progettuali, metodi e fattori esterni possano modellare il processo in termini di punti di forza e limiti. In particolare il testo indaga progetti modulari contemporanei, particolarmente rilevanti in un'epoca di migrazioni di massa, e riflette su come essi possano passare da un uso temporaneo a uno permanente e diventare rilevanti su scala urbana, traendo ispirazione da esempi storicizzati e da approcci 'informali'.

Il modulo, come idea progettuale e metodo costruttivo, e la sua importanza per la definizione degli standard abitativi

L'impiego di elementi costruttivi modulari migliora l'efficienza della costruzione e l'organizzazione dello spazio in quanto può dar luogo a una struttura indipendente utilizzabile anche per gli alloggi di soccorso. Con l'evolversi degli standard la modularità si è allineata alla sostenibilità grazie a elementi adattabili che consentono flessibilità, modificabilità e durabilità

in caso di ampliamento (De Giovanni, 2018). L'impianto geometrico dell'insediamento, generato dall'accostamento delle singole unità abitative, è parte integrante degli studi sugli alloggi di massa: il razionalismo, ad esempio, privilegia aspetti geometrici regolari rispetto a quelli tecnologici (Hilpert, 1987), preferendo soluzioni con una maggiore sostenibilità economica (Anderson and Anderson, 2006).

Soprattutto per ragioni di urgenza temporale l'Unione Europea ha adottato sempre più spesso soluzioni standardizzate, ricorrendo ad alloggi modulari a partire da container rifunzionalizzati (Kreichauf, 2018; Fig. 1). In questo caso l'uso di strutture modulari, anche se non originariamente destinate a scopi abitativi, viene giustificato per raggiungere quella 'armonizzazione' che l'Unione Europea promuove in materia di asilo (EUAA, 2023) ed è considerato una soluzione sostenibile in quanto i moduli, in teoria, potrebbero essere smontati e riutilizzati (Bologna, 2018). Tuttavia i rifugiati e i richiedenti asilo tendono spesso a rimanere in alloggi temporanei più a lungo del previsto (Albadra, Coley and Hart, 2018) e quindi alcune soluzioni possono non soddisfare, nel tempo, i requisiti di sostenibilità, durata dei materiali e comfort (UNHCR, 2023b). Gli aiuti umanitari spesso si concentrano nell'offrire un riparo immediato dopo un evento calamitoso, trascurando aspetti architettonici rilevanti (Monk and Herscher, 2021) e lasciando aperte le questioni su come trovare un equilibrio tra l'accesso rapido a un riparo e soluzioni più risolutive rispetto alla carenza diffusa di alloggi, come rilevato dall'SDG 11 (UN-Habitat, 2015).

Soluzioni modulari per l'accoglienza in momenti di crisi e oltre

Nel caso di migrazioni di massa il modulo, in quanto unità autonoma, acquisisce valore per la sua adattabilità a diversi contesti sperimentata soprattutto in ambito militare. Dopo la Seconda Guerra Mondiale le caserme sono state spesso riutilizzate per ospitare temporaneamente i rifugiati, che all'epoca erano il 7% della popolazione mondiale, una percentuale pari al doppio della popolazione migrante di oggi (IOM, 2021).

La 'capanna Nissen' del 1916 – che prende nome dal suo progettista, l'ingegnere Peter Norman Nissen – è un 'rifugio' modulare costituito da una sequenza di archi prefabbricati in legno coperti da un tetto in lamiera grecata pressata in forma semicircolare e allestito direttamente sul terreno argilloso. Questa struttura poteva essere trasportata facilmente e montata rapidamente e assicurare una migliore protezione dalle intemperie rispetto alle comuni tende da campo (Draper, 2017). Il progetto di Nissen consisteva in «[...] a portable building in which the whole interior space [...] is free and unobstructed, the parts of which may be standardized and fabricated and when unassembled occupy the least possible space, and which may be repeatedly, quickly and readily set up and taken down» (UN General Assembly, 2015, p. 5; Fig. 2). Soprattutto nel dopoguerra in Europa la capanna Nissen fu utilizzata nei campi profughi, tra cui quello di Friedland in Germania che nel 1945 divenne uno dei più grandi; alla capanna base nel tempo vennero aggiunte finestre, divisorii interni e pavimenti in legno (Museum Friedland, n.d.; Fig. 3).

L'esperienza maturata nel dopoguerra spinse ingegneri e architetti ad affrontare la questione del 'riparo' esplorando soluzioni per convertirlo in al-

loggi di lunga durata (Herscher, 2017); lo stesso Le Corbusier sviluppò il progetto di una struttura leggera, facilmente trasportabile e montabile per un riparo di base, che chiamò Murondin (da 'mur' 'muro' e 'rondin' 'tronchi rotondi'). Seppur il Maestro avesse già sperimentato costruzioni modulari con elementi prefabbricati adottò la frugalità dell'epoca come un valore estetico ed etico, concentrandosi su soluzioni che potevano essere realizzate in qualsiasi luogo senza l'aiuto di un esperto di costruzioni. Il suo concetto di Murondin era più che altro un manuale di istruzioni per costruire con qualsiasi materiale disponibile (Fig. 4): se le trincee potevano essere riempite di cemento e tronchi d'albero erano disponibili in loco, qualsiasi persona poteva autocostruirsi un 'rifugio' (Jędruch, 2014).

Negli stessi anni Alvar Aalto, in qualità di visiting professor al MIT, sviluppò dei progetti sugli alloggi per rifugiati in collaborazione con la Croce Rossa statunitense, mettendo la sua creatività a servizio della produzione di massa e della standardizzazione (Schildt, 1991) e proponendo 'rifugi' di emergenza che avrebbero potuto essere successivamente trasformati in alloggi permanenti. Purtroppo i tre progetti, Ready Shelter, Temporary Shelter ed Embryo Shelter, che esemplificano i rifugi modulari sia in stato di emergenza che di riuso successivo, non furono mai realizzati.

La Ready Shelter era composta da quattro stanze quadrate che, in situazioni di emergenza, potevano ospitare tre famiglie condividendo una stanza comune; nella fase post emergenza si poteva trasformare in una casa unifamiliare con due camere da letto (una per modulo) e soggiorno più ampio ricavato dagli altri due moduli, separabile attraverso una porta pieghevole. La Temporary Shelter accostava i moduli in sequenza, creando una fila di sette unità per sette famiglie, con uno spazio comune centrale collegato a una delle cellule ruotato di 90 gradi; in seguito le unità centrali potevano essere rimosse, lasciando che i gruppi di unità esterni diventassero case unifamiliari con camere da letto, bagni e zone giorno e con uno spazio verde a cielo aperto intermedio. L'Embryo Shelter, sottotitolata 'il piano di crescita', consisteva in un modulo organizzato con una fila di tre letti a castello su un lato e da una fonte di riscaldamento al centro; per trasformarlo veniva aggiunto un secondo modulo che accoglieva letti e bagni, mentre il modulo originale veniva riorganizzato in zona giorno (Fig. 5).

Dal confronto tra le diverse proposte emerge che l'imperativo di Nissen era la facilità di (dis)assemblaggio e la trasportabilità, la proposta di Le Corbusier si fondava sulla volontà di individuare soluzioni specifiche da realizzare in loco e ad opera dei futuri abitanti, mentre le sperimentazioni di Aalto miravano a realizzare elementi aggregabili per compensare la carenza di standard una volta che gli alloggi fossero divenuti permanenti.

Oltre l'arrivo: approcci modulari contemporanei e soluzioni avanzate

Durante i flussi migratori delle due Guerre Mondiali diversi architetti hanno sperimentato forme di alloggi di massa sia temporanei che permanenti, ma dopo la Seconda diverse Agenzie internazionali sono intervenute direttamente nella progettazione di alloggi di emergenza (Herscher, 2017). L'UNHCR svolge ancora oggi un ruolo fondamentale nelle missioni di soccorso e nella definizione di standard abitativi; tut-



Fig. 1 | Construction of temporary container homes for refugees in Calais, 2015 (credit: H. Wildschut).

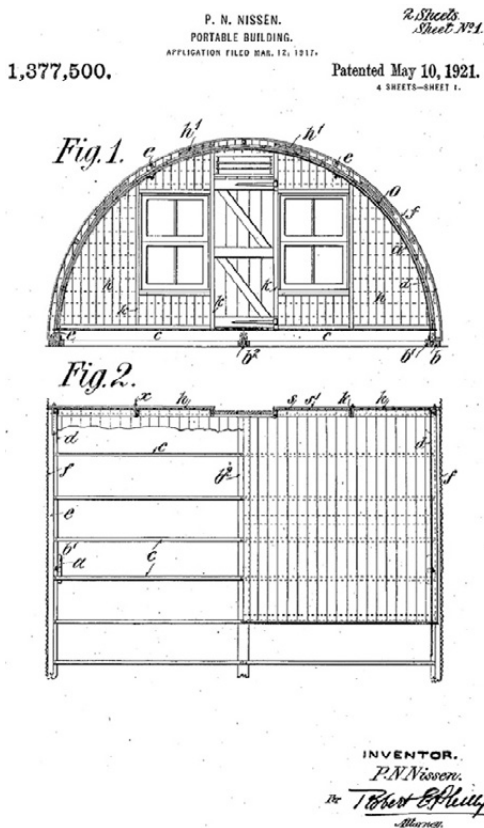


Fig. 2 | Sketches of the Nissen hut as part of the patent application filed by Norman Peter Nissen in 1917 (credits: US Patent Office, 2023).



Fig. 3 | A street inside the Friedland transit site 1947: 220 huts dominated the look of the camp in the first years after WWII (credit: Friedland Museum).

tavia gli sforzi compiuti in ambito umanitario per migliorare le condizioni di vita dei rifugiati attraverso alloggi di qualità rischiano di promuovere un 'modello di alloggio' legato esclusivamente alle logiche del soccorso senza distinguere tra prima accoglienza e stabilizzazione, avendo formato nel tempo tecnici specializzati solo nella produzione di alloggi di emergenza (Monk and Herscher, 2021).

Nonostante ciò l'UNHCR ha avviato alcune collaborazioni con architetti con l'obiettivo di migliorare gli standard di accoglienza degli sfollati; ne è esempio il premio Pritzker Shigeru Ban con la sua Paper Log House, realizzata con tubi di cartone rivestiti di poliuretano e fissati all'interno di casse di birra riempite di sacchi di sabbia (Fig. 6); i tubi, spesso quattro millimetri e larghi dieci centimetri, sono disponibili in tutto il mondo, offrono protezione e isolamento dalle intemperie e si possono montare in sei / dieci ore senza la necessità di manodopera specializzata. Rispetto agli alloggi per i rifugiati Ban ha sottolineato che dovrebbero possedere gli stessi standard qualitativi di quelli realizzati su richiesta di una committenza (Christian, 2014); l'ammirazione per il lavoro di Alvar Aalto ha influenzato tutta la sua produzione con riguardo alla sostenibilità e al legame emotivo tra persone e architetture che possono evolversi in base al luogo e al tempo di utilizzo (Kimmelmann, 2014; Fig. 7); la Paper Log House può essere smontata e riutilizzata o riciclata.

La Relief Housing Unit (RHU) è un altro esempio della collaborazione tra l'UNHCR, la Fondazione IKEA e un gruppo di designer industriali, all'interno dell'iniziativa Better Shelter. Le RHU sono modulari, costituite da un telaio in acciaio e da pannelli semirigidi per pavimento e pareti, possono essere facilmente imballate e trasportate (Fig. 8), sono facili da assemblare (richiedono meno di sei ore) e soddisfano gli standard abitativi stabiliti a livello internazionale (Sphere, 2018). Anche se l'UNHCR promuove l'impiego di materiali locali per i 'rifugi', solo di recente per le RHU, che hanno già soccorso oltre 80.000 persone, si sta iniziando a sviluppare soluzioni che integrano risorse locali (Better Shelter Organization, 2023; Fig. 9).

Nell'ultimo decennio l'impiego di unità modulari è diventato una valida soluzione anche per rispondere alle esigenze di alloggio della crescente popolazione di migranti. In particolare in Europa ha preso campo la conversione di strutture modulari originariamente destinate a scopi diversi dall'alloggio e tra queste i container (Kreichauf, 2018); se da un lato l'UNHCR riconosce i vantaggi di queste strutture come possibilità di fornire alloggi semi-permanenti e prontamente disponibili, dall'altro ne sottolinea gli alti costi di produzione e trasporto e la possibile inadeguatezza rispetto ad aspetti di natura sociale e culturale (UNHCR, 2023).

In risposta al flusso migratorio del 2015 Berlino ha poi introdotto le Tempohomes, villaggi con container adattati agli standard abitativi locali, composti da circa 250 unità disposte per creare strade, spazi per l'amministrazione e servizi comuni (Baumann, 2020). Ogni unità è composta da tre container: un modulo centrale per i servizi igienici e la cucina è affiancato da due container-camera da letto che possono ospitare quattro persone (Fig. 10). Tuttavia i moduli mancano di un adeguato isolamento, con conseguenti disagi in caso di condizioni climatiche estreme, e pongono problemi per i costi di manutenzione e la loro sosteni-

bilità, non offrendo la possibilità di una loro riconversione eco-compatibile (Scalisi and Sposito, 2021). I residenti spesso personalizzano gli spazi abitativi con arredi o piante secondo gli usi e le culture dei propri Paesi di origine, talvolta confliggendo con le norme di sicurezza e antincendio (Misselwitz et alii, 2022); tuttavia gli operatori locali sottolineano l'atmosfera di quartiere che ricorda quella di un'area residenziale suburbana e la facilità di gestione, agevolata dal piano unico dell'inse-diamento (Fig. 11).

Alla Biennale di Architettura di Venezia 2023 il prototipo Essential Home della Norman Foster Foundation reinterpreta il tema gli alloggi di emergenza: sponsorizzato da Holcim, uno dei principali produttori del settore edile, consiste in un'unità modulare replicabile, con una notevole somiglianza alla capanna Nissen nella forma e nel principio progettuale (Fig. 12). Anche se l'aspetto e la concezione di questi moduli abitativi di emergenza sembrano rimasti sostanzialmente invariati per oltre un secolo, il progetto sperimentale sposta l'attenzione sull' 'assemblaggio intelligente' e sulla sostenibilità, utilizzando materiali innovativi come il calcestruzzo low-carbon che, una volta bagnato, si solidifica in 24 ore (Benetti, 2023); il nuovo materiale vanta una riduzione significativa (70%) dell'impronta di carbonio rispetto a cementi tradizionali (Bonas, 2023; Fig. 13).

Sul potenziale della modularità per rifugiati | Tra gli esempi contemporanei è evidente il netto contrasto tra le soluzioni modulari che propongono approcci sostenibili e quelle che invece si fondano su un uso pragmatico: Paper Log House si caratterizza per la possibilità di disassemblaggio e ri-assemblaggio, i container di Berlino rimangono soluzioni pratiche, la ricerca condotta con la Essential Home testa materiali e metodi di assemblaggio innovativi mentre la Better Shelter integra il sistema di base a telaio in acciaio con materiali reperibili localmente, un approccio concettuale in parte opposto rispetto alle speculazioni del Murondin di Le Corbusier.

Da un punto di vista architettonico, considerando la sostenibilità non solo in termini ecologici ma anche sociali (rispetto all'inclusività), la progettazione modulare di alloggi e 'ripari' dovrebbe svincolarsi da una visione esclusivamente emergenziale e integrarsi nel contesto urbano, come suggerito dall'Obiettivo 11 delle Nazioni Unite (UN-Habitat, 2015), risolvendo la dimensione di 'eterotopia' delle strutture temporanee (Ebeling, 2017) e superando il carattere di indesiderabilità (Agier, 2016) che caratterizza i villaggi container recintati di Berlino. A tal proposito, nonostante abbiano quasi cento anni, le speculazioni di Alvar Aalto sui 'piani di crescita' sembrano sorprendentemente senza tempo così come attuale appare la concezione di Le Corbusier sugli alloggi per i rifugiati che si estendeva già a una dimensione urbana, in quanto considerava il Murondin come parte di una futura co-abitazione che avrebbe sempre 'incluso' le persone che occupavano temporaneamente l'abitazione (Herscher, 2017).

Rispetto alla Better Shelter la Essential Home offre un più alto livello di qualità di vita e dichiara fin dalla sua presentazione la replicabilità su ampi insediamenti (Fig. 14); tuttavia, sebbene si possa sostenere che la qualità complessiva del modulo possa essere migliorata, esso rimane in qualche modo

legato a una logica di insediamento per aree (di soli rifugiati) perimetrata e regolamentata e nelle quali l'integrazione è limitata (Hailey, 2009). Le Essential Home esprimono quindi la condizione di straordinarietà dei campi per rifugiati (Bathla and Barthenstein, 2022), in contrasto con i principi di coesistenza e integrazione in ambito urbano promosso da Doug Saunders (2011) su Arrival City.

La distanza tra i progetti di accoglienza ai fini umanitari e quelli di integrazione in ambito urbano è stata fortemente dibattuta durante la 'crisi dei rifugiati' europea del 2015, con appelli a sfruttare l'emergenza come occasione per mettere a punto soluzioni innovative (Friedrich et alii, 2017). Così come la modularità rappresenta la migliore soluzione per risolvere problemi di tempo e flessibilità d'uso, gli interventi modulari realizzati in ambito urbano si sono dimostrati altrettanto efficienti: già nel 1926 Walter Gropius, architetto visionario del Bauhaus, sosteneva la necessità di adottare il modulo in edilizia per ottimizzare economia, tecnologia e design (Baumann, Brendgens and Neumüllers, 2002).

Per ridurre il costo degli affitti ed elevare gli standard di vita in presenza di un'elevata domanda di alloggi dopo la Prima Guerra Mondiale, Gropius ha condotto esperimenti modulari a Dessau-Törten (Fig. 15) attraverso l'ampia razionalizzazione di ogni aspetto del processo di costruzione che si è tradotta in una pianificazione economica dell'insediamento, in una tempestiva preparazione del sito e nella produzione in loco dei moduli edilizi; questo approccio non solo ha ridotto i costi di trasporto, ma ha permesso agli operatori di lavorare su moduli specifici, accelerando in modo significativo il processo di costruzione complessivo tanto che nella fase finale gli operatori sono riusciti a completare un'unità in sole sei ore (Gropius, 2021).

Un totale di 255 unità abitative è stato realizzato con un processo edilizio altamente razionalizzato: mattoni forati prefabbricati in cemento, lastre in calcestruzzo a presa rapida e componenti in acciaio per finestre e porte sono stati assemblati in rigide catene di montaggio (Fig. 16). Servizi essenziali come luce, riscaldamento, igiene e benessere hanno consentito la realizzazione di unità abitative unifamiliari con giardini e servizi igienici comuni; a parte questi ultimi il progetto di Gropius segna standard abitativo che oggi è possibile considerare adeguato, sebbene gli utenti abbiano poi modificato, secondo gusti ed esigenze propri, le soluzioni standardizzate (Fig. 17). Dessau-Törten potrebbe quindi essere letta come una sperimentazione riuscita di standardizzazione dell'edilizia urbana sotto la costante pressione dei fattori tempo e costo (Schwartzing, 2012).

In contrapposizione all'approccio 'formale' di Gropius Saunderson sostiene che la Arrival City per eccellenza è 'informale' (Schmal, Elser and Scheuermann, 2018), laddove gli insediamenti informali si sviluppano con mezzi e materiali a disposizione e risultano inclusivi attraverso l'adozione di ripetizioni modulari 'conosciute'. Alla luce di quanto esposto è allora da chiedersi se questi particolari insediamenti urbani possono integrare la sfera informale con un'architettura più strutturata, come proponeva il Murondin di Le Corbusier.

Una possibile risposta è offerta da insediamenti come Housing Cairo (Angéll, Malthe-Bartnes and Technische Hochschule, 2016) che richiamano l'attenzione di pianificatori e progettisti

a sfruttare la capitale egiziana come caso studio sperimentale di ricerca e progetto. La megalopoli ha un vasto patrimonio abitativo sviluppatosi in modo 'informale' che in altre città sarebbe probabilmente considerato 'consolidato' (Fig. 18): in uno spazio urbano conflittuale, gli abitanti hanno realizzato non solo le proprie abitazioni ma anche le infrastrutture, con un approccio simile a quanto avviene negli insediamenti temporanei e di emergenza, costruendo per moduli, parte dopo parte. Un tale operato è quindi da invito ai progettisti per rispondere in modo intelligente alla incapacità di pianificazione con innesti puntuali ed estemporanei all'interno di un patrimonio abitativo esistente.

In conclusione è possibile asserire che i progettisti dovrebbero guardare al modulo come strumento per armonizzare, nel settore dell'edilizia, due istanze temporali, quella dell'emergenza e quella della permanenza, senza ripensarlo radicalmente ma 'ri assemblandolo' in modo innovativo (Friedrich et alii, 2017). Non a caso si vuole porre l'attenzione sulla somiglianza tra la capanna Nissen e la Essential Home così come sulla vicinanza tra la sperimentazione urbana contemporanea dell'Housing Cairo e quella moderna del Murondin. Il tempo, fattore determinante nella produzione del patrimonio edilizio, può diventare atemporale attraverso l'applicazione di approccio modulare, alla cui risposta e nuove forme di applicazione concorrono i vari esempi discussi.

Architecture stands as a testament to humankind's evolution, transforming critical events of our times into tangible spatial expressions. By addressing the challenges posed by these events, architectural responses offer insight into the complex array of factors involved, applied technologies included. Modularity, in this sense, can be seen as an architectural technique tailored to address specific tasks requiring efficiency in terms of time, adaptability, scalability, and cost-effectiveness (Anderson and Anderson, 2006). Consequently, modular construction, both as a planning concept and building method, appears in various design typologies, notably within housing and emergency shelter contexts. Much like other structures symbolising significant geopolitical moments (Parsloe, 2020), the pragmatic approach of modular design in mass housing has proven its worth in the case of rapidly accommodating large groups of people all arriving simultaneously.

Mobility and time, in fact, play crucial roles in the realm of shelter design. The time-consuming nature of architecture, marked by regulatory and construction processes, is compounded by our world's rapid and unpredictable nature (Schön, 1973). Human mobility is a fundamental aspect of our existence (Cresswell, 2006), with migration – driven by the pursuit of improved living conditions, whether by choice or necessity – being intricately linked with the issue of housing at a new destination (Harari, 2018). In the face of a growing global population, shifting climatic conditions, and an unprecedented number of people on the move (IOM, 2021), reconsidering shelter and housing through the lens of modularity becomes imperative for living up to SDG 11, which advocates for the basic human right to adequate housing (UN General Assembly, 2015). By 2030, the UN predicts that 3

billion people, or about 40 per cent of the world's population, will need adequate and affordable housing, adding significantly to the more than 100 million people already displaced today (UN-Habitat, 2015).

Against this background, this contribution aims to explore the architectural potential of the module by addressing the challenges posed by high-demand housing, for which time and materials are critical factors influencing accommodation. The discussion begins by examining the module's design theory and its impact on defining living standards. It then provides experimental and built design practice examples to highlight various potentials. This evaluation considers how design approaches, methods, and external factors shape the process and reveal both strengths and limitations. Subsequently, the text delves into contemporary modular solutions, particularly relevant in an era of ongoing mass migration, and investigates how modular solutions can transition from temporary to permanent states and become relevant on an urban scale, drawing inspiration from historical examples and the informal design sphere.

The module, as a design concept and construction method, and its value in defining housing standards | Using single modular building elements enhances construction efficiency and spa-

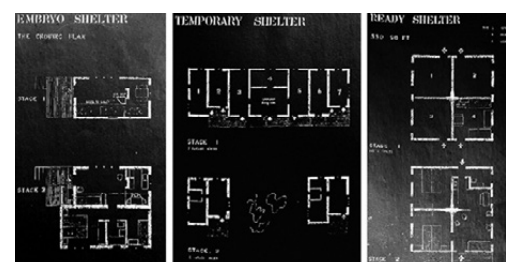
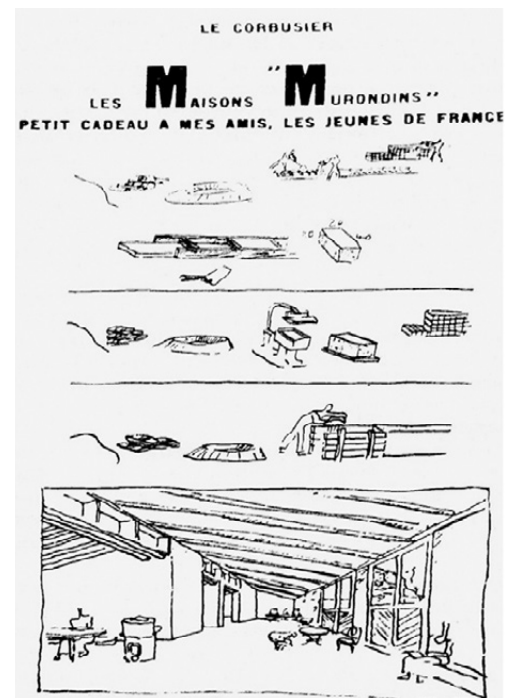


Fig. 4 | Sketches from the Murondin building manual, a proposal for ad-hoc housing for displaced people (source: Le Corbusier, 1942).

Fig. 5 | Alvar Aalto's plan for the Ready Shelter, Temporary Shelter, and Embryo Shelter (source: Schildt, 1991).



Fig. 6, 7 | The Paper Log House by Shigeru Ban in construction by volunteers (source: Christian, 2014).



Fig. 8 | The Better Shelter's Relief Housing Unit and its packaging (source: Better Shelter Organization, 2023).



Fig. 9 | More recently, Better Shelter has been engaged in ways of filling the basic steel system of the Relief Housing Unit with local on-site materials, as is the case in Assam in India in 2023 (source: Better Shelter Organization, 2023).

tial organisation. Additionally, a module can function as an independently constructed structure, offering the advantage of self-contained components that can be applied for basic relief housing. As standards evolve, modularity aligns with sustainability through adaptable elements that create flexibility, modifiability, and durability when extended (De Giovanni, 2018). Explorations of geometric

form through individual living units assembled into housing ensembles are integral to architectural visions concerned with mass accommodation – architectural rationalism, in that sense, prioritises the specific application of geometry over technology (Hilpert, 1987). In contrast, handcrafted and individual approaches in construction can cause unfeasible expenses (Anderson and Anderson, 2006).

Particularly for reasons of time urgency, European states are increasingly adopting standardised, time-limited solutions, often resorting to modular container-based housing to respond to sudden demands in living spaces (Kreichauf, 2018; Fig. 1). Here, the use of module structures, even though never originally intended for housing purposes, is justified as a mean to achieve 'harmonisation' in the EU common asylum approach (EU-AA, 2023) and is further promoted as a sustainable solution as modules, theoretically, could be dismantled and reused (Bologna, 2018). However, reality shows that refugees and asylum seekers often tend to stay in temporary accommodation longer than expected (Albadra, Coley and Hart, 2018). In this sense, some modular solutions seem to fall short of their sustainability, duration, materiality, and well-being (UNHCR, 2023b). Humanitarian aid often focuses on providing immediate shelter in response to disaster, side-lining deeper architectural considerations (Monk and Herscher, 2021). The spatial aspects of humanitarian aid primarily address immediate relief, leaving questions on how to reshape the balance between quick access to shelter and more integrated solutions amid the global housing shortage, as highlighted by SDG 11 (UN-Habitat, 2015).

Modular solutions to accommodate people in moments of crisis and beyond

When considering the unpredictability of events that trigger mass migrations, the module, as a self-contained unit, appeals due to its adaptability to various locations – a quality extensively utilised in military settings. Following World War II, military modular barracks were often repurposed to temporarily house refugees, which amounted to 7% of the global population, a percentage twice that of today's migrant population (IOM, 2021).

The Nissen Hut of 1916 – named after its designer, engineer Peter Norman Nissen – is a modular shelter made from a sequence of prefabricated timber arches and a roof of corrugated iron pressed into a semi-circular form. The hut could be easily transported, swiftly set up, and provided better protection from the elements than standard field tents (Draper, 2017). Nissen's design referred to «[...] a portable building in which the whole interior space [...] is free and unobstructed, the parts of which may be standardised and fabricated and when unassembled occupy the least possible space, and which may be repeatedly, quickly and readily set up and taken down» (US Patent Office, 1921, p. 5; Fig. 2). Particularly in the post-war period in Europe, the Nissen Hut served in refugee camps, among others, in Friedland, a transit site in Germany, established in 1945. Friedland became one of the largest refugee camps and while the first huts consisted of timber arches and a simple layer of corrugated iron sheets built directly on the local loamy floor, over time, windows, separating walls, and wooden floors were added (Museum Friedland, n.d.; Fig. 3).

The exceptional circumstances of war compelled engineers and architects to address the question of shelter. Some explored ways of converting the temporary accommodation into enduring forms of housing at a later point, extending beyond their provisional state (Herscher, 2017). During WWII, Le Corbusier played around the idea of a lightweight, easily transportable and mountable structure for basic shelter relief, which he called Murondin ('mur' translating into 'wall', 'rondin' into 'round logs'). While Le Corbusier had experimented on modular constructions through the provision of prefabricated elements before, demonstrating a more self-referential sign (Eisenmann, 1972), he came to understand the frugality of the time as a value, both aesthetically and ethically, focussing on solutions that could be built on any spot without the help of a construction expert. His concept of the Murondin was more of an instruction manual for building with any material available (Fig. 4). When trenches could be filled with concrete and round logs were provided, anyone could auto-construct their shelter (Jeđruch, 2014).

At the same time, Alvar Aalto (as a visiting scholar at MIT) developed housing for refugees in collaboration with the US Red Cross, recognising Aalto's practical understanding and approach to combine creativity with mass production and standardisation (Schildt, 1991). Aalto proposed emergency shelters that could later be transformed into permanent housing. Never realised, three plans, Ready Shelter, the Temporary Shelter and the Embryo Shelter, exemplify modular shelters in both emergency and transformed states of re-use.

The Ready Shelter consists of four square rooms. In emergencies, it could accommodate three families sharing one communal room, while in Stage 2, it would convert into a family house with two bedrooms (one per module), a larger space for living made out of the two other modules, and separable through a foldable door. The Temporary Shelter assembles modules in a sequence, creating a row of seven units for seven families, with the central communal space attached to one of the living units rotated by 90 degrees. In the second stage of development, the central units are removed, leaving the two exterior units on each side to become single-family homes with bedrooms, bathrooms, and living areas and creating an open green space between the units. The Embryo Shelter, subtitled 'the growing plan', consists of a module featuring a row of three bunk beds on one side and a central heating oven. To transform it, a second module of similar size is added for bed- and bathrooms, while the original module is repurposed for living (Fig. 5).

While Nissen's main imperative was his shelter's easy (dis)assembly and transportability, Le Corbusier's proposal stems from the concern of on-site ad-hoc solutions and their practicability to be realised by their future inhabitants. On the other side, Aalto's experiments underline how variable geometries can bridge the gap between living standards between basic shelter and long-term housing, adding an architectural foresightedness to his proposal by emphasising modifiability, thus ensuring its architectural feasibility over time.

Beyond arrival: the current modular approaches and the call for advanced solutions | During World War I and II migration, various designers

experimented with temporary and enduring forms of mass housing. Yet, after World War II and the establishment of the international community, their affiliated agencies, such as UNHCR, shifted emergency housing design from the realm of architects to institutions (Herscher, 2017). UNHCR plays a pivotal role in relief missions and housing standards; however, the efforts in humanitarian aid to improve refugee living conditions through upgrading shelter design risk imposing a 'global shelter imaginary', perpetuating a universal perception of relief and blurring the distinctions between crisis and response while creating specialised shelter production subfields (Monk and Herscher, 2021).

However, there are various examples of UNHCR collaborations with architects to better standards in sheltering the displaced, among them, Pritzker Prize laureate Shigeru Ban and his Paper Log House, using polyurethane-coated paper tubes secured within sandbag-filled beer crates (Fig. 6). These four-millimetre thick, ten-centimetre-wide paper tubes, available worldwide, offer protection from the elements, insulation, and ease of assembly in six to ten hours by unskilled workers. Ban emphasised that housing quality, whether for refugees or 'on-order', should maintain the same standards (Christian, 2014). Admiration for Alvar Aalto's work influenced his architectural work: Ban's focus on sustainability lies in connecting people emotionally to spaces that can evolve diverse identities based on location and time of use (Kimmelman, 2014; Fig. 7) – the Paper Log House can be disassembled and re-used or recycled.

Another UNHCR collaboration is the Relief Housing Unit (RHU), emerging from the Better Shelter initiative with the IKEA Foundation and a group of Swedish industrial designers. RHU units are modular, consisting of a steel frame and semi-rigid floor and wall panels, are easy to assemble (within six hours), and meet internationally established living standards (Sphere, 2018). They can be transported flat-packed (Fig. 8). While UNHCR promotes local materials for shelter, RHUs have served over 80,000 people and only more recently seek to integrate local resources (Better Shelter Organization, 2023; Fig. 9).

In the last decade, the widespread use of externally manufactured modular units has become a prominent solution for addressing the accommodation needs of the increasing refugee population. Particularly in Europe, a significant trend involves the conversion of modular structures originally intended for purposes other than housing, with shipping containers being the primary example (Kreichauf, 2018). While UNHCR recognises the positive aspects of these structures, such as providing semi-permanent and readily available housing, it also points out their high production and transportation costs and their potential to disregard social and cultural norms (UNHCR, 2023a).

In response to the 2015 refugee influx, Berlin introduced Tempohomes, container villages adjusted to residential standards, consisting of approximately 250 containers arranged in rows to create small streets and spaces for administration and services (Baumann, 2020). Each unit comprises three containers: one central module for service functions like the bathroom, toilet, and a small kitchen, flanked by two bedroom containers, accommodating four persons in total (Fig. 10). However, these units lack proper insulation, lead-

ing to discomfort during extreme weather and raising concerns about maintenance costs and sustainability. Moreover, the use of new containers misses opportunities for environmentally friendly upcycling (Scalisi and Sposito, 2021). Tempohome residents often customise their living spaces through adding mobile elements or cultivating plants. Some adaptations reflect the domestic practices of their countries of origin, yet sometimes lead to conflicts with management over safety and fire regulations (Misselwitz et alii, 2022). Staff on-site highlights the neighbourhood atmosphere, reminiscent of a suburban residential area, and the ease of management facilitated by the single-story height of the village (Fig. 11).

At this year's Venice Biennale of Architecture, the Essential Home prototype by the Norman Foster Foundation seeks to reimagine emergency housing. Sponsored by Holcim, a major building industry producer, it features a modular unit that can be expanded into a settlement, bearing a striking resemblance to the Nissen hut in shape and principle (Fig. 12). While the form and concept of emergency housing modules have remained largely unchanged for over a century, this research project shifts focus towards 'intelligent assembly' and sustainability. It utilises innovative materials like concrete that hardens post-assembly with watering and employs circular design principles (Benetti, 2023). This approach claims a significant (70%) reduction in carbon footprint compared to traditional solutions (Bonas, 2023; Fig. 13).

On the potential of modularity for those who will arrive | Within the contemporary examples, a stark contrast is evident between modular solutions that attempt to consider sustainable approaches and those that mirror a more pragmatic use. While some designs, such as the Paper Log House, stem from the idea of dis- / reassembly, the container villages of Berlin remain more efficient solutions, while the Essential Home Research seeks to test innovative material and assembly methods. As the discourse on ecological and ethical aspects evolves amid the debate on sustainability, some widely practised solutions seek a possible reinvention. Better Shelter, for instance, looks into how the basic steel frame system could be combined with locally found materials – a somewhat reversed thought process when compared to speculations on shelter as proposed by Le Corbusier's Murondin.

From an architectural point of view, and when considering sustainability not merely from an ecological perspective, to achieve integrative solutions, designing housing and shelter through modularity might need to be disentangled from the realm of humanitarian aid and focus instead on the urban housing context – as suggested through SDG 11 (UN-Habitat, 2015). This could further counteract the 'heterotopian' spaces the secluded temporary houses present as of now (Ebeling, 2017) and act against the character of unwantedness (Agier, 2016), as transmitted by the fenced container villages in Berlin, allowing for gradual integration into an urban pattern. In this regard, despite being nearly a hundred years old, Alvar Aalto's speculations on the 'growing plan' seem strikingly timeless. Also, Le Corbusier's understanding of quality in refugee housing extended to an urban dimension, as he considered his Murondin settle-

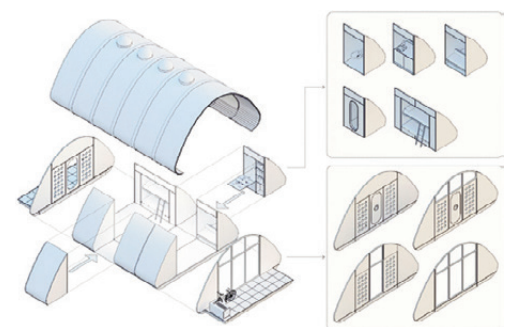
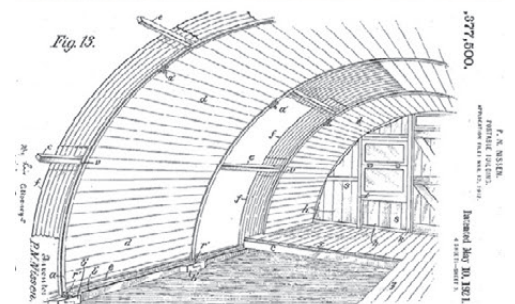
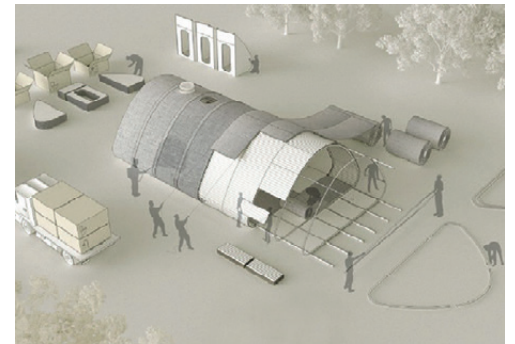


Fig. 10 | Shipping containers are assembled into a Tempohome in Berlin (credit: the Author, 2022).

Fig. 11 | A scene within a Tempohome container village in Berlin (credit: the Author, 2022).

Fig. 12 | Conceptual Image of the set-up process of an Essential Home unit; A sketch of the Nissen hut as part of the patent application filed by Norman Peter Nissen in 1917 (credit: Norman Foster Foundation; US Patent Office, 2023).

Fig. 13 | The Essential Home unit (credit: Norman Foster Foundation, 2023).



ments as part of a future co-living that would always include a share of people temporarily occupying living space (Herscher, 2017).

Unlike the Better Shelter initiative, the Essential Homes introduce an increased living standard from the start and extend the design approach to the realm of scalability, showcasing scenarios of entire settlements made of the unit (Fig. 14). While one could argue that the living condition could significantly be bettered through the Essential Home project, it remains in an established refugee logic to some extent, as the refugee camp is a conditional space of regulation, dependent on the factor of time and potential integration (Hailey, 2009). As the Essential Homes would not need an adaptation process, the integration into a prevailing regional design and access to urban networks that can dissolve the extraordinary state of the camps (Bathla and Barthenstein, 2022), they might conserve a status as refugee city contrary to the concept of urban integrative co-existence that is famously promoted in Doug Saunders' observations around the Arrival City (Saunders, 2011).

The separation of humanitarian shelter solutions from urban discourse has been heavily debated during the much-cited European 'refugee crisis' in 2015, with calls to leverage the influx for innovative urban living solutions (Friedrich et alii, 2017). While modular solutions excel in addressing time and flexibility issues, historical examples on an urban scale have proven to be equally efficient. Walter Gropius, a visionary Bauhaus architect, advocated for expanding modular solutions into the building industry to align economy, technology, and design as early as 1926 (Baumann, Brendgens and Neumüllers, 2002).

In pursuit of his vision for affordable rents and contemporary living standards amid the mass demand for housing following WWI, he conducted modular experiments in Dessau-Törten (Fig. 15). His strategy to minimise rental costs led to an extensive rationalisation of every facet of the construction process, translating into economic planning for the settlement, timely site preparation, and on-site production of building modules. An approach that reduced transportation expenses and enabled the operators to work on specific modules, thereby significantly expediting the overall construction process; in the final phase, operators could construct a unit in just six hours (Gropius, 2021).

A total of 255 housing units was built in a highly streamlined construction process: prefabricated concrete hollow bricks, rapid concrete slabs, and steel components like windows and doors were put together in strict assembly lines (Fig. 16). The defined essentials (access to light, warmth, basic standards of hygiene, and well-being) resulted in a settlement composed of single-family housing units with gardens and communal closets (Baumann, Brendgens and Neumüllers, 2002). Aside from private bathrooms, Gropius's social and design-driven vision mark living standards that are considered adequate today, yet

it had not entirely aligned with the response of the users, who have altered the standardised solutions according to their own tastes (Fig. 17). Dessau-Törten could thus be seen as an unfinished experiment in urban housing standards under the constant pressure of time and cost efficiency (Schwartz, 2012).

As opposed to Gropius' formal approach, Saunders argues that the ultimate arrival city is informal (Schmal Elser and Scheuermann, 2018). Informal settlements work inherently with available elements, thus being integrative through embracing homegrown modular repetitions, adding a poetic level that refracts theories around standardising housing. Could new urban constellations evolve, relating the informal sphere and structural elements, as Corbusier's *Murondin* proposes?

Projects like Housing Cairo (Angéllil, Malterre-Barthes and Technische Hochschule, 2016) call for the engagement of planners and architectural designers in this realm, taking the Egyptian capital as testing ground for research and design experiments. The megapolis has extensive housing stock that came into existence 'informally' and that in other cities would probably be considered 'established' (Fig. 18). Amid the massive need for housing in a conflictual urban space, people take matters in their own hands, extending building activities not only to housing but infrastructure. Similar to the informal adaptation inside of any form of shelter that the inhabitants undertake themselves, what becomes evident is an architecture that stems from inside the city and is built modularly, one by one. This could be understood as an invitation for designers to learn an already spoken language and to re-engage through potential insertions within existing housing stock.

Amid the various ways the module invites designers to bridge time urgency and long-lasting solutions in the realm of housing, the need to keep in touch with the various approaches becomes evident, as well as a necessary redefinition of rigid solutions that stem from humanitarian aid on the one side, and urban planning on the other (Friedrich et alii, 2017) – the critical role that the cited research groups could withhold, underline the significance in mediating a transformative process. The repetitive characteristic of the module seems to require the use of the modular concept not radically rethought but innovatively re-assembled. In this sense, the similarity of the Nissen hut and the Essential Home in form and strategy is striking, as is the closeness of contemporary urban experimental considerations (as in Housing Cairo) and the *Murondin* compendium. Time, the determining factor in the production of housing stock, becomes timeless through the application of the modular system and, following this logic, has been presented in terms of sustainability through the various examples discussed, inviting rediscovery and new application forms.

Fig. 14 | A settlement made of the Essential Home unit, extending beyond the housing function (credit: Norman Foster Foundation, 2023).

Figs. 15-17 | Air view of the urban settlement Dessau-Törten, 1926-1928; Housing Development; Historic view of the urban settlement Dessau-Törten and the recent modifications (credits: Stiftung Bauhaus Dessau; source: hvr.d.art/o/53030).

Fig. 18 | Informal urban housing in Cairo (source: Angéllil, Malterre-Barthes and Technische Hochschule, 2016).

References

- Agier, M. (2016), *Managing the Undesirables – Refugee Camps and Humanitarian Government*, Policy Press, Cambridge.
- Albadra, D., Coley, D. and Hart, J. (2018), “Toward healthy housing for the displaced”, in *The Journal of Architecture*, vol. 23, issue 1, pp. 115-136. [Online] Available at: doi.org/10.1080/13602365.2018.1424227 [Accessed 13 October 2023].
- Anderson, M. and Anderson, P. (2006), *Prefab Prototypes – Site-Specific Design for Offsite Construction*, Princeton Architectural Press.
- Angéil, M., Malterre-Barthes, C. and Technische Hochschule (2016), *Housing Cairo – The Informal Response*, Ruby Press.
- Bathla, N. and Bartheinstein, J. D. (eds) (2022), *The [Seasonal] Arrival City – Designing for Migrants’ Transient Right to the City*, ETH Wohnforum ETH CAS, Zurich. [Online] Available at: doi.org/10.3929/ethz-b-000543590 [Accessed 18 October 2023].
- Bauman, H. (2020), “Moving, Containing, Displacing – The Shipping Container as Refugee Shelter”, in Scott-Smith, T. and Breeze, M. E. (eds), *Structures of Protection? Rethinking Refugee Shelter*, Forced Migration, vol. 39, pp. 15-29, Berghahn Books, New York. [Online] Available at: doi.org/10.2307/j.ctv1tbhr26 [Accessed 13 October 2023].
- Baumann, K., Brendgens, G. and Neumüllers, M. (2002), *Bauhaus Architecture in Dessau*, Bauhaus Dessau Foundation, Dessau.
- Benetti, A. (2023), “Norman Fosters tiny dwelling as the evolution of the minimal house”, in *Domusweb*, 13/06/2023. [Online] Available at: domusweb.it/en/sustainable-cities/gallery/2023/06/09/norman-foster-foundation-and-holcim-present-essential-home.html [Accessed 13 October 2023].
- Better Shelter Organization (n.d.), “The Relief Housing Unit (RHU)”, in *Bettershelter.org*. [Online] Available at: bettershelter.org/rhu/ [Accessed 13 October 2023].
- Bologna, R. (2018), “Complementarietà fra permanente e temporaneo | Complementarity between permanent and temporary”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 4, pp. 81-88. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/4102018 [Accessed 18 October 2023].
- Bonas, A. (2023), “Essential Homes Research Project by Norman Foster, at Venice Architecture Biennale 2023”, in *Metalocus*, 18/05/2023. [Online] Available at: metalocus.es/en/news/essential-homes-research-project-norman-foster-venice-architecture-biennale-2023 [Accessed 13 October 2023].
- Christian, M. (2014), *Shigeru Ban – Humanitarian Architecture*, Aspen Art Press, Aspen.
- Cresswell, T. (2006), *On the Move – Mobility in the Modern Western World*, Taylor & Francis.
- De Giovanni, G. (2018), “Emergenza sanitaria e temporaneità | Health emergency and impermanence”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 4, pp. 13-20. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/422018 [Accessed 11 October 2023].
- Draper, K. L. (2017), *Wartime Huts – The Development, Typology and Identification of Temporary Military Buildings in Britain 1914-1945*, PhD Dissertation, Wolfson College, Department of Architecture, University of Cambridge. [Online] Available at: core.ac.uk/download/pdf/146463385.pdf [Accessed 13 October 2023].
- Ebeling, K. (2020), “Architectures of Exception – Negative Heterotopias and Repositories of Frontiers”, in *ARCH+*, vol. 239, pp. 220-227.
- Eisenmann, P. (1972), “Cardboard Architecture – House I”, in Rowe, C. (ed.), *Five Architects*, Oxford University Press, New York, pp. 15-24. [Online] Available at: monoskop.org/images/9/96/Rowe_Colin_Five_Architects_part.pdf [Accessed 13 October 2023].
- EUAA – European Union Agency for Asylum (2023), *Asylum Report 2023 – Annual Report on Situation of Asylum in the European Union*. [Online] Available at: euaa.europa.eu/sites/default/files/publications/2023-07/2023_Asym_Report_EN_0.pdf [Accessed 13 October 2023].
- Friedrich, J., Haslinger, P., Takasaki, S. and Forsch, V. (2017), *Zukunft – Wohnen – Migration als Impuls für die Stadt*, Jovis, Berlin.
- Gropius, W. (2021), *Bauhaus buildings Dessau*, Lars Müller Publishers, Zurich.
- Hailey, C. (2009), *Camps – A Guide to 21st Century Space*, MIT Press, Cambridge.
- Harari, Y. N. (2018), *Sapiens – A Brief History of Humankind*, Harper Perennial, New York.
- Herscher, A. (2017), *Displacements – Architecture and Refugee*, Sternberg, Berlin.
- Hilpert, T. (1987), *Le Corbusier 1987-1987 – Genius – Laboratory of Ideas*, Christian und Reims Verlag, Hamburg.
- IOM – International Office of Migration (2021), *World Migration Report 2022*. [Online] Available at: worldmigrationreport.iom.int/wmr-2022-interactive/ [Accessed 13 October 2023].
- Jędruch, D. (2014), “Transitory, Temporary”, in *Autoportret*, vol. 3, issue 46. [Online] Available at: autoportret.pl/en/artykuly/transitory-temporary/ [Accessed 13 October 2023].
- Kimmelman, M. (2014), “Shigeru Ban – In the Service of Society”, in *Shigeru Ban – Humanitarian Architecture*, Aspen Art Press, Aspen, pp. 13-29.
- Kreichauff, R. (2018), “From Forced Migration to Forced Arrival – The Campization of Refugee Accommodation in European Cities”, in *Comparative Migration Studies*, vol. 6, issue 7, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s40878-017-0069-8.pdf [accessed 13 October 2023].
- Le Corbusier (1942), *Les Constructions Muronains*, Chiron, Paris.
- Misselwitz, P., Dalal, A., Fraikin, A., Noll, A. and Zaripova, V. (eds) (2022), *Tempohomes – Untersuchung sozialräumlicher Aneignungspraktiken von Geflüchteten in ausgewählten Berliner Gemeinschaftsunterkünften* Universitätsverlag der TU Berlin, Universitätsverlag der TU Berlin. [Online] Available at: depositionce.tu-berlin.de/items/3811f370-ca24-478d-83a5-14413c5828ea [Accessed 13 October 2023].
- Monk, D. B. and Herscher, A. (2021), *Ikea Humanitarianism and Rightless Relief*, University of Minnesota Press. [Online] Available at: doi.org/10.5749/j.ctv1rnpjtw [Accessed 13 October 2023].
- Museum Friedland (n.d.), “Das Grenzdurchgangslager Friedland – Geschichte und Gegenwart”, in *Museum Friedland*. [Online] Available at: museum-friedland.de/museum/grenzdurchgangslager/ [Accessed 13 October 2023].
- Parsloe, T. (2020), “From Emergency Shelter to Community Shelter – Berlin’s Tempelhof Refugee Camp”, in Scott-Smith, T. and Breeze, M. E. (eds), *Structures of Protection? Rethinking Refugee Shelter*, Forced Migration, vol. 39, pp. 275-286. [Online] Available at: jstor.org/stable/j.ctv1tbhr26?turn_away=true [Accessed 13 October 2023].
- Saunders, D. (2011), *Arrival City – How the largest migration in history is reshaping our world*, Penguin Books, New York.
- Scalisi, F. and Sposito, C. (2021), “Strategie e approcci ‘green’ – Un contributo dall’off-site e dall’upcycling dei container marittimi dismessi | Green’ strategies and approaches – A contribution from the off-site and upcycling of discarded shipping containers”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 10, pp. 92-119. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1092021 [Accessed 13 October 2023].
- Schildt, G. (1991), *Alvar Aalto – The Mature Years*, Rizzoli Publishers, New York.
- Schmal, P. C., Elser, O. and Scheuermann, A. (eds) (2018), *Making Heimat – Germany Arrival Country*, Hatje Cantz, Berlin.
- Schön, D. (1973), *Beyond the Stable State – Public and private learning in a changing society*, Penguin Publishers, Harmondsworth.
- Schwarting, A. (2012), *Die Siedlung Dessau-Törten – 1926 bis 1931*, Stiftung Bauhaus Dessau, Dessau/Leipzig.
- Sphere (2018), *The Sphere Handbook – Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response*. [Online] Available at: spherestandards.org/handbook/editions/ [Accessed 13 October 2023].
- UN General Assembly (2015), *Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, 70th Session 70/1 – Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf [Accessed 13 October 2023].
- UN-Habitat (2015), *Housing at the Centre of the New Urban Agenda*. [Online] Available at: unhabitat.org/housing-at-the-centre-of-the-new-urban-agenda-0 [Accessed 13 October 2023].
- UNHCR – United Nations High Commissioner for Refugees (2023a), *UNHCR Global Report 2022*. [Online] Available at: data.unhcr.org/en/documents/details/101400 [Accessed 13 October 2023].
- UNHCR – United Nations High Commissioner for Refugees (2023b), *Emergency Shelter Standards 2023*. [Online] Available at: emergency.unhcr.org/emergency-assistance/shelter-camp-and-settlement/shelter/emergency-shelter-standard [Accessed 13 October 2023].
- US Patent Office (1921), *Entry 1,377,500 – P. N. Nissen – Portable Building – Application filed Mar. 12, 1917*. [Online] Available at: image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/1377500 [Accessed 13 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	08 September 2023
Revised	14 October 2023
Accepted	26 October 2023
Published	31 December 2023

MODULARITÀ E ARCHITETTURA ADATTIVA

Una strategia per la gestione di sistemi d'involucro complessi

MODULARITY AND ADAPTIVE ARCHITECTURE

A strategy for managing complex envelope systems

Valentino Manni, Luca Saverio Valzano

ABSTRACT

A fronte del cambiamento climatico globale all'ambiente costruito è ascrivibile un crescente fabbisogno energetico per il mantenimento di condizioni di benessere indoor. L'architettura adattiva, ispirata al pensiero sistemico e alla biomimetica, può dar vita a organismi edilizi complessi che rispondono dinamicamente alle sollecitazioni ambientali attraverso la modulazione della fisicità del proprio involucro, riducendo il dispendio energetico per la climatizzazione. L'illustrazione di un quadro rappresentativo di progetti e ricerche evidenzia il ruolo della modularità nell'architettura adattiva in termini di principi di funzionamento, modalità di controllo, modalità di risposta, complessità funzionale e strutturale. Il contributo mette in luce la centralità della modularità quale strategia per affrontare la complessità multidimensionale dei sistemi tecnologici per l'involucro adattivo.

In the face of global climate change, the built environment is experiencing an increasing demand for energy to maintain indoor comfort conditions. Inspired by systemic thinking and biomimicry, adaptive architecture can give rise to complex building organisms that dynamically respond to environmental stimuli by modulating the physicality of their envelope, thereby reducing energy consumption for climate control. Illustrating a representative framework of projects and research highlights the role of modularity in adaptive architecture in terms of operational principles, control modes, response mechanisms, functional complexity, and structural complexity. This contribution underscores the centrality of modularity as a strategy to address the multidimensional complexity of technological systems for adaptive envelopes.

KEYWORDS

architettura adattiva, involucro edilizio adattivo, complessità, modularità, tassellazioni

adaptive architecture, adaptive building envelope, complexity, modularity, tessellations



Valentino Manni is a Researcher and Lecturer at the Department of Architecture and Design and Scientific Director of the Innovative Technological Systems Laboratory at the Polytechnic University of Turin (Italy). His research has focused on sustainable architectural design, the exploitation of renewable energy sources for the building envelope, and technological systems for glazed facades and solar shading. E-mail: valentino.manni@polito.it

Luca Saverio Valzano is a PhD Candidate at the Department of Architecture and Design and a Teaching Associate at the Department of Structural Engineering Building and Geotechnical Engineering, Polytechnic University of Turin (Italy). His research focuses on studying adaptive biomimetic technological systems for the building envelope. During his studies, he has investigated topics such as construction in developing countries, the design of high-rise buildings, and parametric design. E-mail: luca.valzano@polito.it

Le cause del cambiamento climatico sono molteplici, complesse e interconnesse e dipendono in gran parte dall'azione antropica sull'ecosistema. Poiché nelle città avviene la maggior parte dei processi di conversione dell'energia a supporto delle attività antropiche, ne deriva che ad esse è ascrivibile una quota considerevole del fabbisogno energetico mondiale e delle conseguenti emissioni di gas climalteranti in atmosfera (UNEP, 2020). Si stima che attualmente circa il 55% della popolazione mondiale viva in aree urbanizzate e si prevede che tale quota sia destinata ad aumentare nei prossimi decenni, con un raddoppio entro il 2050 del patrimonio edilizio mondiale rispetto a quello del 2015 (CIESIN, IFPRI and CIAT, 2011; UNEP, 2016).

Nel quadro descritto, in ragione di una sostenuta crescita demografica, i Paesi in via di sviluppo assumono un ruolo preminente nel determinare un aumento dell'azione antropica sull'ambiente. Inoltre, poiché la maggior parte di essi si colloca nelle zone a clima tropicale, si prevede che a livello globale la domanda energetica per raffrescamento eguaglierà quella per riscaldamento nel 2060 (Birmingham Energy Institute, 2015) e si ipotizza che entrambe le modalità di condizionamento dell'aria saranno conseguite attraverso l'impiego di pompe di calore ad alimentazione elettrica (Butera, 2021).

Risulta evidente come la razionalizzazione del metabolismo dell'ambiente costruito rappresenti un tema ineludibile dell'era contemporanea, in termini energetici e ambientali ma anche economici e sociali, che sollecita la ricerca di soluzioni in grado di ridurre significativamente l'impatto antropico sull'ambiente (Antonini, 2019). Richard Rogers (1998, p. 4) sostiene che «[...] our cities are the major destroyer of the ecosystem and the greatest threat to mankind's survival on the planet. [...] While the need for cities and the inevitability of their continued growth will not diminish, city living per se need not lead to civilization's self-destruction. [Ma afferma di credere] that the arts of architecture could evolve to provide crucial tools for safeguarding our future».

I progetti e le ricerche condotte nell'ultimo ventennio sembrano poter soddisfare le aspettative di Rogers rispetto alla capacità dell'innovazione tecnologica di fornire soluzioni in risposta alle cogenti questioni ambientali. Infatti alla scala architettonica è possibile ricorrere a tecnologie in grado di dare vita a un organismo edilizio che, superando la consolidata concezione di equilibrio statico con l'ambiente, si ponga in relazione dinamica continua con il proprio contesto, modificando aspetti della propria fisicità al variare delle sollecitazioni ambientali, al fine di conseguire un controllo razionale del microclima interno e di mitigare il dispendio energetico.

Nuovi indirizzi dell'architettura demandano la capacità di adattamento all'involucro, in quanto esso è la principale interfaccia per la regolazione degli scambi di energia e di materia tra ambiente interno ed esterno, cambiandone la concezione da statica a dinamica. In questa prospettiva l'involucro adattivo, inteso come responsivo, dinamico ed efficiente in termini energetici (IEA, 2022), da subsistema per la protezione dagli agenti climatici si trasforma in sistema in grado di interagire con i contesti esterno e interno, mutando la propria natura da elemento di separazione a elemento di mediazione caratterizzato da un considerevole

grado di complessità funzionale e tecnologica.

Il contributo mette in luce come l'applicazione dell'approccio modulare renda possibile affrontare la complessità dell'architettura adattiva. Partendo dalla definizione del significato di adattività, complessità e modularità e procedendo attraverso la descrizione degli attuali indirizzi di sviluppo della ricerca sul tema e di un insieme rappresentativo di progetti e sperimentazioni si mettono in luce ricadute e prospettive dell'approccio modulare nell'architettura adattiva.

L'architettura adattiva | Il concetto di architettura adattiva fu introdotto negli anni '70 da Nicholas Negroponte per indicare un tipo di architettura che possiede la capacità di modificarsi in tempo reale per rispondere alle complesse e mutevoli condizioni ambientali: «[...] responsive, sometimes called adaptable, or reactive, means the environment is taking an active role, initiating to a greater or lesser degree changes as a result and function of complex or simple computations» (Negroponte, 1975, p. 132). Tillmann Klein del TU Delft sostiene che l'architettura adattiva «[...] not dissimilar to Nature, it responds dynamically to change» (cit. in Mazzucchelli, 2018, p. 79). Il dibattito scientifico coglie questa analogia con il mondo naturale e mette in luce come l'architettura adattiva, ispirandosi all'approccio biomimetico nella ricerca tecnologica e nel progetto (Benyus, 1997; Jeronimidis and Gruber, 2012), concepisca un edificio quale sistema in grado di svolgere molteplici funzioni in virtù della capacità di auto-organizzarsi come un organismo biologico auto-poietico (Maturana and Varela, 1985).

Se già Negroponte immaginava l'architettura adattiva quale risultato dell'integrazione della potenza di calcolo e della capacità tecnologica, negli ultimi decenni, la disponibilità di dispositivi e tecnologie per il monitoraggio e il controllo – come la sensoristica, l'Internet of Things (IoT), il Building Management System (BMS), l'Intelligenza Artificiale (AI) – insieme a sofisticati dispositivi attuatori, elettrici, pneumatici o chimico-fisici, concretizza gli scenari prefigurati (d'Estrée Sterk, 2005), dando vita a un'architettura cognitiva, interattiva e complessa.

Gli strumenti computazionali anticipano la capacità responsiva dell'architettura fin dalla fase di progetto; la capacità predittiva del Computational Design basato sulla modellazione e sulla simulazione parametrico-algoritmiche, implementato con il Building Information Modeling, i Big Data e il Data Exchange (Davino and Bassolino, 2019), è in grado di descrivere il livello prestazionale dell'organismo architettonico adattivo cogliendo la complessità delle relazioni tra sistema edificio-impianto e utenza. Per descrivere gli scenari di maggiore efficienza energetica è possibile considerare le azioni ambientali, le prestazioni dei sistemi tecnologici d'involucro, le caratteristiche dei dispositivi per la generazione energetica, per l'illuminazione e per la climatizzazione indoor e, persino, i modelli di comportamento dell'utenza (Energy Efficiency Based on User's Behaviour). In sintesi, l'analisi «[...] dell'interazione tra edificio, ambiente esterno e utente, può costituire un potente strumento di conoscenza» (Andaloro, 2021, p. 79) per l'ottimizzazione dei modelli di funzionamento dell'architettura adattiva.

La complessità dei sistemi adattivi | L'elevato livello di integrazione tecnologica conferisce all'ar-

chitettura adattiva un considerevole grado di complessità, in ragione della molteplicità delle relazioni che si stabiliscono tra le parti interagenti che ne costituiscono l'articolazione e della variabilità delle funzioni che vengono loro demandate. Il pensiero sistemico interpreta la complessità quale caratteristica di un sistema, concepito come un aggregato organico e strutturato di parti mutuamente interagenti, in virtù della quale il comportamento del sistema non è determinato, riduttivamente, da quello delle singole parti che lo costituiscono, ma dipende dalle modalità della loro interazione. Ciriadini (1979, 1984) mette in luce come l'interconnessione tra le parti di un sistema complesso ne determini la struttura, specificando che le sue caratteristiche fondamentali sono la totalità, la trasformazione e l'autoregolazione, che danno luogo, in architettura, a sistemi complessi adattivi, per i quali valgono le leggi dell'omeostasi e della retroazione.

L'epistemologia della complessità, che trova la propria razionalizzazione nel lavoro di Morin (1985), deve le proprie premesse agli studi di fine Ottocento di Poincaré (1902, 1905, 1909; Toscano, 2008) e a quelli, nella prima metà del Novecento, di matematici e fisici come Hadamard (1921), Schrödinger (1926a, 1926b) e Andronov (Andronov, Vitt and Khaikin, 1966). Contributi decisivi al pensiero complesso furono offerti dalla Tectologia di Bogdanov (Rispoli, 2012), dalla cibernetica di Wiener (1948), von Foerster (2003) e Weaver (1948) e, in seguito, dagli studi di Prigogine (1993) sulla termodinamica che presto si volsero all'esame dei sistemi adattivi in molteplici domini, tra cui quello ecologico, cogliendo la pluralità delle relazioni non lineari tra le parti dei sistemi naturali e la tendenza a mettere in atto processi di auto-organizzazione autopoietici.

L'auto-organizzazione generalmente viene intesa come una forma di sviluppo del sistema attraverso influenze ordinanti e limitative, provenienti dagli stessi elementi che costituiscono il sistema, che permettono di raggiungere un maggior livello di complessità. Hofstadter (1985) descrive l'auto-organizzazione quale composizione di totalità coerenti a partire da parti disperse, mentre Capra (2015) ne mette in luce la non linearità; De Toni e Comello (2005) ne evidenziano, invece, la capacità di conferire robustezza e resilienza a un sistema.

La molteplicità delle parti costituenti un sistema complesso e la variabilità delle reciproche influenze (nel senso di frequenza di cambiamento nel tempo), in essere o in potenza, in quanto la struttura di un sistema è anche molteplicità delle interazioni possibili (Piaget, 1978), impongono l'applicazione di strategie per la gestione della complessità. Un sistema tecnologico può trarre vantaggio dall'articolazione modulare della propria struttura (sia nella sua dimensione logica sia nella sua esplicitazione fisica) quale strategia per la gestione della propria complessità intrinseca. In un sistema, a fronte dell'aumento del grado di complessità prodotto dall'auto-organizzazione, la modularità rappresenta uno strumento per l'individuazione di soluzioni di maggiore efficienza ed efficacia.

La modularità per la gestione della complessità | La Legge della Varietà Necessaria, teorizzata da William Ross Ashby (1957) nell'ambito dei propri studi sulla cibernetica e sui sistemi complessi, stabilisce che per ogni sistema complesso

che ne governa un altro, il sistema più ampio debba avere un livello di complessità comparabile al sistema governato. In altre parole il controllo è possibile solo se il sistema regolatore possiede una varietà e una flessibilità pari o superiore al sistema complesso regolato. Ciò conduce a due strategie equivalenti ma diametralmente opposte: o si aumenta la complessità del sistema regolatore o si riduce quella del sistema regolato. Ne deriva la vantaggiose di scomporre un sistema complesso, difficilmente gestibile, in una pluralità di componenti di minore complessità, al fine di renderne

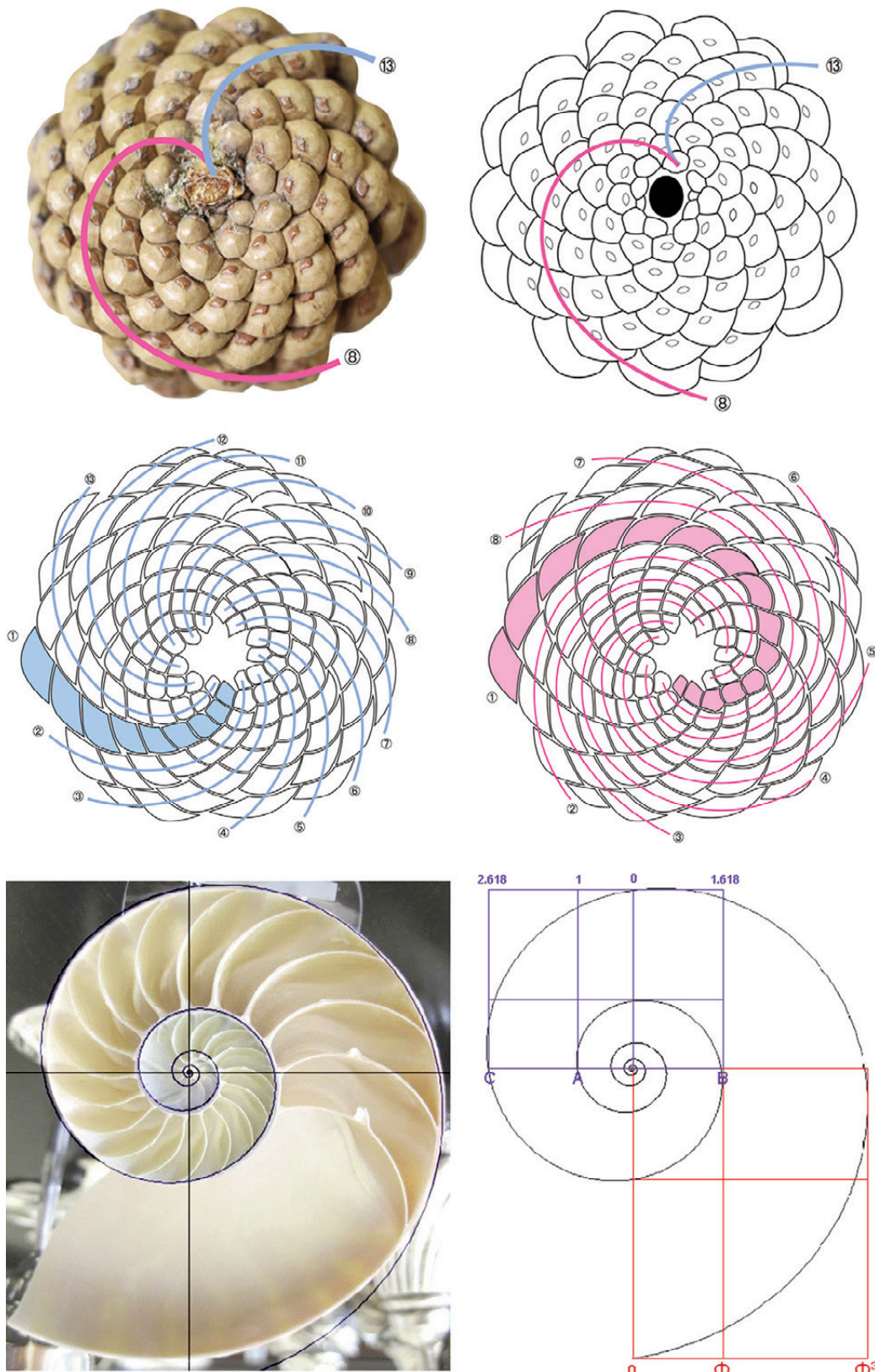
più semplice controllo e gestione (Salingaros, n.d.). Tale scomposizione dà luogo alla modularità che, nell'ambito del progetto, può essere definita «[...] a very general set of principles for managing complexity» (Langlois, 2000, p. 19).

L'approccio modulare consiste nella suddivisione della struttura di un sistema complesso in unità logiche o funzionali disgiunte ma coerenti e interdipendenti – chiamate moduli – distintamente individuate e caratterizzate da un livello di complessità gestibile. I moduli, per mezzo delle reciproche relazioni, rimandano sempre a una strut-

tura superiore, risultante dalla combinazione delle parti; pertanto la modularità non è mai 'chiusa', in quanto la struttura può essere indefinitamente estesa; inoltre la possibilità di stabilire relazioni tra diverse strutture sottolinea il carattere aperto della modularità; essa non è un'astrazione: se ne ha riscontro ovunque, soprattutto in Natura, in quanto essa rappresenta il modo con cui, a fronte della complessità dell'ecosistema, il vivente esplica l'auto-organizzazione attraverso la ricombinazione e l'adattamento di pattern funzionali (Tucci, 2017).

Nel 1917 Thompson (1992), attraverso il volume *On Growth and Form*, divulgava i propri studi condotti con metodi analitici sui processi naturali relativi alla creazione di forme, mettendo in luce come le regole matematiche che governano i fenomeni di crescita degli organismi viventi siano fondate su regolarità e modularità. Nei processi morfogenetici piante e animali manifestano la tendenza a svilupparsi secondo successioni matematiche e schemi geometrici ricorsivi riconducibili alla successione numerica di Fibonacci e alla sezione aurea. Lo sviluppo del numero di spirali brattee su una pigna (Fig. 1), la disposizione dei semi nello stame del girasole e l'accrescimento della conchiglia calcareaa del nautilus (Fig. 2) seguono la successione di Fibonacci e una ricorsività modulare e scalare, dimostrando come in Natura il concetto di modularità afferisca principalmente a principi di auto-organizzazione e di autoregolazione secondo schemi ascrivibili a un dominio prettamente logico, in cui la regola che governa la complessità supera la precisa manifestazione spaziale, temporale e materiale.

Il pensiero di Thompson ha profondamente influenzato il lavoro di studiosi e architetti, da Frei Otto a Norman Foster, da Toyo Ito a Nicholas Grimshaw¹, infatti anche un'architettura può essere concepita attraverso l'emulazione dei processi di ottimizzazione messi in atto dai sistemi viventi (Tucci and Carlo Ratti Associati, 2023) e può essere interpretata come un organismo modulare scomponibile in diverse unità interagenti. La modularità può dare forma al progetto fin dalle sue primissime fasi: dalla sua concezione, alla specificazione tecnologica, alla costruzione fino alla gestione, la modularità, semplificandone la fenomenologia complessa, rende possibile la concretizzazione dell'architettura.



La modularità nell'architettura adattiva | Un

approccio modulare nell'architettura adattiva si traduce nell'impiego di moduli con configurazioni e funzioni variabili ma formalmente e unitariamente definite e interrelate, cosicché ciascun modulo costituisce una parte omogenea e unitaria di una medesima struttura, una parte del tutto in grado di perseguire specifici obiettivi. Pur presentando un'articolazione complessa i componenti di una struttura modulare sono comunque facilmente gestibili e maggiormente controllabili e rispondenti alla pluralità delle esigenze. Infatti l'articolazione modulare consente a un sistema di graduare funzioni e prestazioni dei moduli, in modo da passare

Fig. 1 | Spirals on the pinecone following the Fibonacci sequence (source: craftofcoding.wordpress.com; credit: M. Wirth, 2022).

Fig. 2 | Growth of the shell of the nautilus (source: golden-number.net; Meisner, 2014).

da compiti semplici a compiti più complessi, muovendosi da un limitato livello di autonomia a un elevato livello di complessità.

La misura dell'articolazione modulare e il grado di interrelazione tra i moduli influenzano specifici aspetti del sistema che, se spiccatamente modulare e composto da un numero considerevole di moduli, è più facile da mantenere e ampliare, ma manifesta un'elevata complessità intrinseca, derivante dalla necessità di gestire la coordinazione tra i moduli; di contro un sistema limitatamente modulare, composto da un numero esiguo di moduli, è più difficile da mantenere ma la coordinazione tra i moduli è più semplice. Tali considerazioni invitano a valutare l'utilizzo di specifici componenti attraverso il grado di separabilità e di aggregabilità dei componenti di un sistema modulare, il loro livello di interdipendenza e le regole attinenti all'architettura generale del sistema (Sorrenti, 2017).

I vantaggi dell'applicazione dell'approccio modulare in architettura sono molteplici. Da un punto di vista compositivo è possibile caratterizzare l'oggetto architettonico in virtù di molteplici soluzioni ottenute dalla combinazione di un numero finito di componenti, mentre dal punto di vista tecnologico è possibile modulare le soluzioni in ragione della complessità delle funzioni e della molteplicità dei requisiti definiti. Dal punto di vista produttivo la fornitura di varietà limitate di componenti si traduce nella possibilità di conseguire costi di produzione inferiori, mentre dal punto di vista gestionale l'omogeneità e l'intercambiabilità dei moduli agevolano i processi di riparazione e di sostituzione, riducendo i costi della manutenzione nel tempo.

Nell'architettura contemporanea numerosi progetti mettono in luce come l'approccio modulare sia essenziale per la realizzazione di sistemi di involucro adattivi, in termini di installazione, funzionamento, controllo prestazionale, manutenibilità e figurabilità architettonica. Il funzionamento della facciata meridionale dell'Institut du Monde Arabe (1987) a Parigi, di Jean Nouvel, si basa sulla ripetizione modulare di diaframmi meccanici, ispirati all'occhio umano, a cui è demandato il controllo dell'illuminazione naturale negli ambienti interni.

Il sistema di schermatura solare delle Al-Bahar Towers (2012) ad Abu Dhabi di Aedas Architects e Arup presenta un'articolazione di un nido d'ape di moduli dotati di elementi tessili dispiegabili che asseconda lo sviluppo curvilineo delle facciate; l'approccio modulare consente di attuare risposte locali differenziate, proporzionali al gradiente delle sollecitazioni ambientali, di semplificare la manutenzione e di caratterizzare l'immagine architettonica (Fig. 3). L'involucro edilizio del Kiefer Technic Showroom di Graz (2007) in Austria, di Ernst Giselbrecht, si basa sulla cinematica di moduli di facciata interconnessi; una schermatura solare, realizzata in pannelli metallici e attuata da dispositivi meccanici, dà vita a un'ampia gamma di configurazioni (Fig. 4).

L'involucro del Media-TIC Building di Barcellona (2009; Fig. 5), di Enric Ruiz Geli, è stato sviluppato attraverso un processo morfogenetico di trasformazione di una griglia modulare (Fig. 6) che compone una trama di cuscini gonfiabili in etilene tetrafluoretile (EFTE) i quali consentono il passaggio della luce pur assorbendone la componente termica (Albiñana, 2011). Una rete di sensori integrati e indipendenti governa dispositivi



Fig. 3 | Al-Bahar Towers (2009-12) in Abu Dhabi, designed by Aedas Architects and Arup (source: archello.com; credit: C. Richters, 2014).



Fig. 4 | Kiefer Technic Showroom (2006-07) in Graz, designed by Ernst Giselbrecht and Partner ZT GmbH (source: archtonic.com; credit: P. Ott, 2010).

Fig. 5 | Media-TIC Building (2007-09) in Barcelona, designed by Enric Ruiz Geli and Coud9: main façade and detail of modules (source: flickr.com; credit: F. Romero, 2017).

pneumatici che, insufflando aria nei cuscini, ne modificano la capacità schermante e coibente, dando luogo a una responsività commisurata al livello di radiazione solare locale che contribuisce al conseguimento di una maggiore efficienza globale del sistema.

Tassellazioni, origami e kirigami: la ricerca sulla modularità nell'architettura adattiva | La frontiera della ricerca sull'involucro adattivo ricorre alla metodologia analitica della matematica e della geometria per conseguire progressi tecnologici e inedite soluzioni formali. In geometria, la ripetizio-

ne di una figura su una superficie piana o spaziale attraverso variazioni quali rotazione, riflessione, alternanza, traslazione o trasformazione scalare dà luogo a una configurazione modulare definita 'pattern'. La tipologia più semplice di pattern è la 'tassellazione', ovvero la ripetizione all'infinito di una o più figure geometriche su una superficie, senza lacune o sovrapposizioni.

In generale le tassellazioni possono assumere, come modulo, figure geometriche piane come triangoli, quadrati ed esagoni. Il triangolo equilatero è un'ottima figura modulare impiegabile nelle tassellazioni in quanto da un lato è in grado di

Façade design and development
Ramification studies force calculation

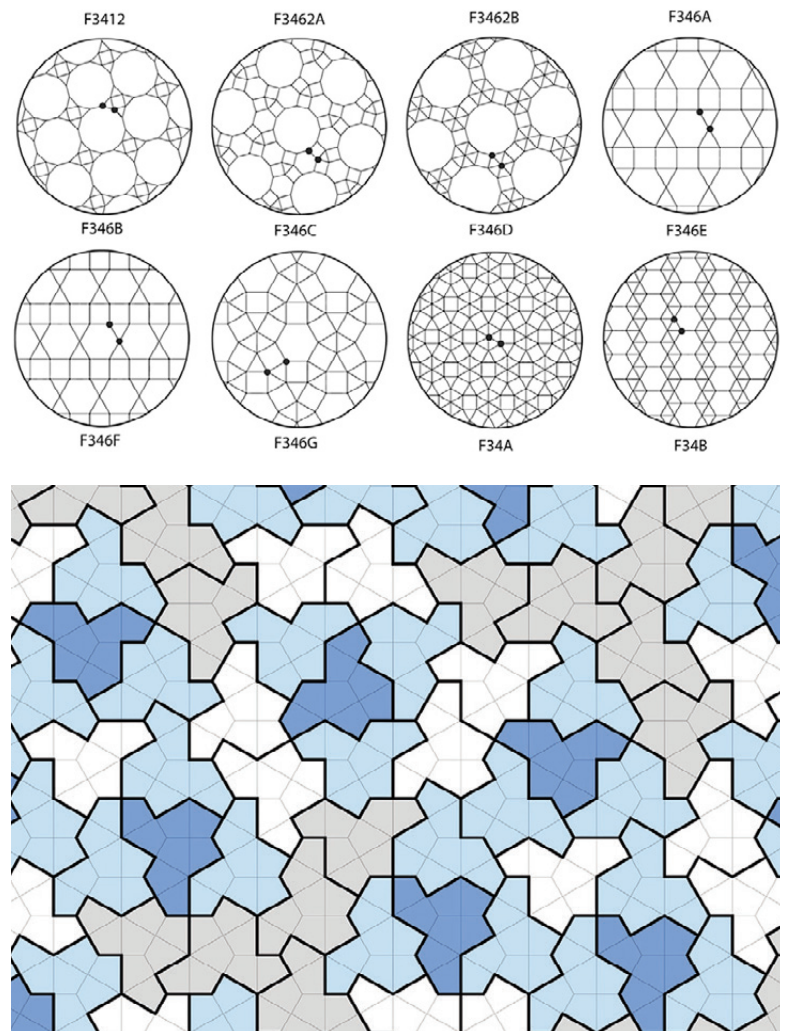
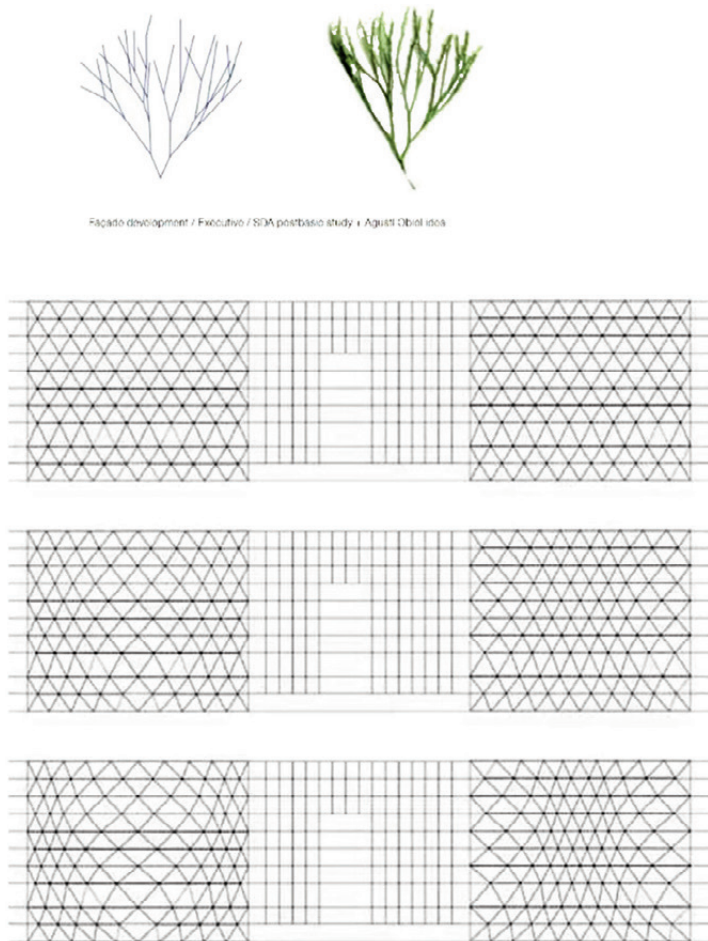


Fig. 6 | Media-TIC Building (2007-09) in Barcelona, designed by Enric Ruiz Geli and Coud9: the morphogenetic process of the façade (source: Albiñana, 2011).

Fig. 7, 8 | Some different types of regular polygonal tessellations (source: Friedenberg, 2019); Aperiodic, never repeating 'ein stein' tessellations (source: Smith et alii, 2023).

occupare interamente una superficie senza l'ausilio di altri poligoni, dall'altro la ripetizione del modulo triangolare consente la creazione di altre figure geometriche come il rombo, il trapezio, l'esagono o poligoni stellari.

Le tassellazioni che si ottengono mediante trasformazioni isometriche 'rigide' come traslazione e rotazione vengono definite regolari (Fig. 7). Tra le tassellazioni non regolari o aperiodiche, ovvero tali che nessuna rotazione o traslazione sia in grado di spostare localmente i tasselli l'uno sull'altro, si annoverano quelle randomiche di Lejeune Dirichlet (1850) e di Delaunay (1934) o quelle irregolari di Wang (1961), di Robinson (1971) o di Penrose (1974), scoperta nel 1974 e basata sulla sezione aurea. Nel 2023 il matematico David Smith (Smith et alii, 2023) ha scoperto la tassellazione aperiodica 'ein stein' caratterizzata da un'unica forma le cui combinazioni generano uno schema che non si ripete mai (Fig. 8).

La Natura offre numerosi esempi di tassellazioni, tra cui la superficie alare e gli occhi degli insetti, il favo delle api, il tessuto monocellulare della cipolla, la trama della lamina della foglia, le fratture di un terreno argilloso secco, nonché alcune strutture cellulari animali e vegetali (Fig. 9), dimostrando che la ricorsività di determinati principi geometrici e morfologie, pur differenziatesi per parametri e fattori limitanti, è trasversale a molteplici domini ed è generalmente motivata da fattori biologici,

chimico-fisici e dall'interazione con l'ambiente esterno. Il sistema di schermatura solare del Kolding Campus di Henning Larsen Architects a Grønberg in Danimarca (2014) è un esempio di applicazione di una tassellazione triangolare al progetto di un'architettura adattiva (Fig. 10). Nel sistema di involucro Responsive Façade ideato da Boutros Bou-Nahra², basato su una tassellazione di prismi a base quadrata, pannelli in fibra di vetro polimerizzata ruotano su un asse regolando il guadagno solare con l'ausilio di sensori e attuatori meccanici (Fig. 11).

L'indagine sullo stato dell'arte dell'architettura adattiva mette in luce che la ricerca si sta indirizzando verso l'approfondimento metodologico delle tecniche di tassellazione, come ad esempio la piegatura di superfici nelle tre dimensioni, in analogia con la tecnica orientale dell'origami, al fine di ottenere inedite configurazioni geometriche, dare luogo a nuovi cinematismi e semplificare l'articolazione strutturale dei sistemi tecnologici responsivi riducendone i componenti soggetti ad usura.

A partire dagli anni '70 il crescente interesse della ricerca nei confronti degli origami, dovuto alla loro capacità di dare luogo a tassellazioni che si adattano a superfici di forma libera (Tsiamis, Oliva and Calvano, 2018; Fig. 12) e dei cinematismi che sono in grado di esplicitare, ha dato impulso alla cosiddetta architettura origamica (Rodonò, 2022). Nel tempo i principi alla base degli origami

sono stati impiegati per lo sviluppo di strutture dispiegabili, strutture riconfigurabili e strutture a elevate prestazioni meccaniche. Più recentemente Tomohiro Tachi (2011) dell'Università di Tokyo ha sviluppato il dimostratore Rigid-Foldable Thick Origami, componente d'involucro composto da un insieme di pannelli rigidi uniti sul loro perimetro con materiale flessibile per generare un comportamento cinetico (Fig. 13), mentre Ohira, Eguchi, Okabe e Tanaka (2022) della Keio University hanno sviluppato il dimostratore Ex-Chochin, involucro adattivo realizzato secondo una tassellazione origamica ispirata al pattern Miura, in grado di cambiare forma e tessitura grazie all'azione di attuatori meccanici e di generare un'ampia gamma di configurazioni geometriche (Fig. 14).

Diversi studi e sperimentazioni applicano anche la tecnica del kirigami, variante dell'origami, in cui oltre alla piegatura viene praticato anche l'intaglio. Breathing Façade (Kuboki et alii, 2019) è un sistema modulare per l'involucro adattivo ispirato alle branchie dei pesci composto da membrane in metamateriali polimerici auxetici a memoria di forma in cui sono stati praticati degli intagli per innescare una ventilazione spontanea tra ambiente interno ed esterno (Fig. 15). Infine ricerche come quella condotta dal gruppo del Prof. Overvelde dell'Università di Harvard dimostrano che componenti in metamateriali auxetici basati su articolazioni modulari origamiche, in virtù di una



Fig. 9 | Samples of tessellations in Nature (source: Bellelli, 2022).

Fig. 10 | Kolding Campus (2012-14) in Grønberg, designed by Henning Larsen Architects (sources: kristinejensen.dk; Lucarelli et alii 2020).

struttura 'programmabile' per forma, possono produrre cinematismi senza il ricorso a giunti meccanici, semplificando così i processi di fabbricazione, installazione e manutenzione (Overvelde et alii, 2017).

Riflessioni conclusive su approccio modulare e architettura adattiva | Il problema energetico-ambientale, determinato dall'azione antropica sull'ecosistema, sollecita la riflessione sulle metodologie progettuali e sui futuri indirizzi dell'innovazione tecnologica dell'ambiente costruito, catalizzatore della maggior parte dei processi di conversione dell'energia a supporto delle attività umane.

Nuovi approcci progettuali, basati sull'osservazione e sull'emulazione dei processi di adattamento degli esseri viventi, concepiscono l'organismo edilizio quale sistema in grado di auto-regolarsi e di conseguire un equilibrio omeostatico con l'ambiente, al fine di garantire soddisfacenti livelli di comfort e ridurre il consumo energetico, dando vita all'architettura adattiva. In quest'ottica il contributo presenta una ricognizione sullo stato dell'arte dell'architettura adattiva che, raccogliendo un insieme rappresentativo di studi e progetti, mette in luce il ruolo della modularità nei sistemi responsivi d'involucro attraverso l'esame di aspetti come funzione, configurazione geometrica, funzionamento, controllo e grado di complessità (Tab.1).

Dall'osservazione dei casi riportati è possibile ricavare come i limiti intrinseci dell'architettura adattiva derivino, in primo luogo, dalla complessità che la caratterizza, complessità che si esplicita sia nell'aspetto funzionale che in quello materiale. La molteplicità delle funzioni demandate e la sofisticata struttura sistemica possono dare vita a interferenze incidentali e guasti in grado di pregiudicare gli scenari di progetto, mentre l'elevata articolazione tecnologica espone il sistema al decadimento prestazionale. L'approccio modulare, del quale si ha ampio riscontro nei processi di ottimizzazione e di adattamento dei sistemi complessi nel dominio naturale, è una metodologia che riduce la complessità di un sistema tecnologico e che può essere applicata alle fasi di progettazione, realizzazione, gestione e manutenzione, per conseguire efficienza ed efficacia. Tuttavia si potrebbe dibattere sugli aspetti limitativi del carattere tipologico della modularità che, pur affrancando il progetto dal controllo di una complessità ingestibile, lo vincola a una ripetitiva articolazione tecnologica e formale. Ciononostante numerose esperienze nello scenario contemporaneo, a partire da quelle illustrate, mettono in luce la capacità dell'approccio modulare di garantire i livelli prestazionali attesi e di caratterizzare la figurabilità dell'architettura adattiva.

Progetti, ricerche e sperimentazioni, avvalendosi delle possibilità offerte dalla progettazione

parametrica e dai progressi nella scienza dei materiali, indagano inedite applicazioni della modularità in architettura, come tassellazioni, origami, kirigami e metamateriali, dando luogo a nuove soluzioni tecnologiche e formali che prefigurano sviluppi futuri in un dominio di ricerca multidisciplinare e multiscalare.

Il tema dell'applicabilità scalare dei modelli modulari indagati dalle ricerche in corso individua due principali direzioni di sviluppo: la prima può guidare la ricerca verso lo studio, alla piccola scala, dell'applicazione dell'approccio modulare alla concezione e alla produzione di strutture di nuovi metamateriali, anche grazie alle nanotecnologie; la seconda può indirizzare la ricerca, a una scala urbana, verso l'applicazione della modularità alla concezione della città adattiva, di cui è esempio il progetto di riqualificazione del Waterfront di Toronto di Sidewalk Lab (2019a, 2019b), improvvisamente interrotto nel 2020 a causa della situazione di incertezza economica prodotta dalla pandemia di Covid-19. Se entrambi gli indirizzi di ricerca presentano limiti derivanti dalla disponibilità di investimenti, il primo è più sensibile al grado di maturità tecnologica dei processi produttivi, mentre il secondo è condizionato soprattutto da barriere socioculturali. Pertanto, a fronte delle potenzialità dell'architettura adattiva modulare illustrate, lo sviluppo della ricerca dipenderà dalla propensione di Enti pubblici e aziende a sostenere progetti e

sperimentazioni e dall'attitudine del contesto socioculturale. Infine è importante rilevare che, se finora l'architettura adattiva ha voluto rispondere alle mutevoli condizioni ambientali, per contro, essa non è stata in grado di produrre alcun sostanziale cambiamento nel comportamento umano, mentre dovrebbe essere in grado di responsabilizzare la società, al fine di «[...] creare un rapporto simbiotico che esprima una relazione ecologicamente stabile, e allo stesso tempo reciproca, fra la Terra e gli uomini» (Ulber and Mahall, 2019, p. 98).

The causes of climate change are multiple, complex and interconnected, and depend mainly on anthropogenic action on the ecosystem. Since most of the energy conversion processes supporting human activities occur in cities, they are responsible for a considerable share of the world's energy needs and the resulting emissions of climate-changing gases into the atmosphere (UNEP, 2020). It is estimated that about 55% of the

world's population currently lives in urbanised areas, and this share is projected to increase in the coming decades, with a doubling by 2050 of the world's housing stock compared to that of 2015 (CIESIN, IFPRI and CIAT, 2011; UNEP, 2016).

In the framework described, due to sustained population growth, developing countries assume a prominent role in driving increased anthropogenic action on the environment. Moreover, since most of them are located in tropical climate zones, it is predicted that, globally, energy demand for cooling will equal that for heating in 2060 (Birmingham Energy Institute, 2015); it is assumed that both modes of air conditioning will be achieved through the use of electrically powered heat pumps (Butera, 2021).

It becomes clear that the rationalisation of the metabolism of the built environment represents an inescapable issue of the contemporary era, in energy and environmental terms but also economic and social ones, which urges the search for solutions that can significantly reduce the anthropogenic impact on the environment (Antonini, 2019). Richard Rogers (1998, p. 4) argues that «[...] our cities are the major destroyer of the ecosystem and the greatest threat to mankind's survival on the planet. [...] While the need for cities and the inevitability of their continued growth will not diminish, city living per se need not lead to civilization's self-destruction. [But he also states] that the arts of architecture could evolve to provide crucial tools for safeguarding our future».

The projects and research conducted in the last two decades seem to be able to meet Rogers' expectations with respect to the ability of technological innovation to provide solutions in response to cogent environmental issues. In fact, at the architectural scale, it is possible to resort to technologies capable of bringing to life a building organism that, overcoming the well-established concept of static equilibrium with the environment, places itself in a continuous dynamic relationship with its context, modifying aspects of its physicality as environmental stresses change, in order to achieve rational control of the indoor microclimate and mitigate energy expenditure.

New directions in architecture demand adaptive capacity from the envelope, as it is the primary interface for regulating energy and matter exchanges between the indoor and outdoor environment, changing its conception from static to dynamic. In this perspective, the adaptive envelope, understood as responsive, dynamic and energy efficient (IEA, 2022), transforms from a subsystem for protection from climatic agents into a system capable of interacting with the external and internal contexts, changing its nature from a separating element to a mediating element characterised by a considerable degree of functional and technological complexity.

The paper highlights how applying the modular approach makes it possible to address the complexity of adaptive architecture. Starting with a definition of the meaning of adaptivity, complexity, and modularity and proceeding through a de-

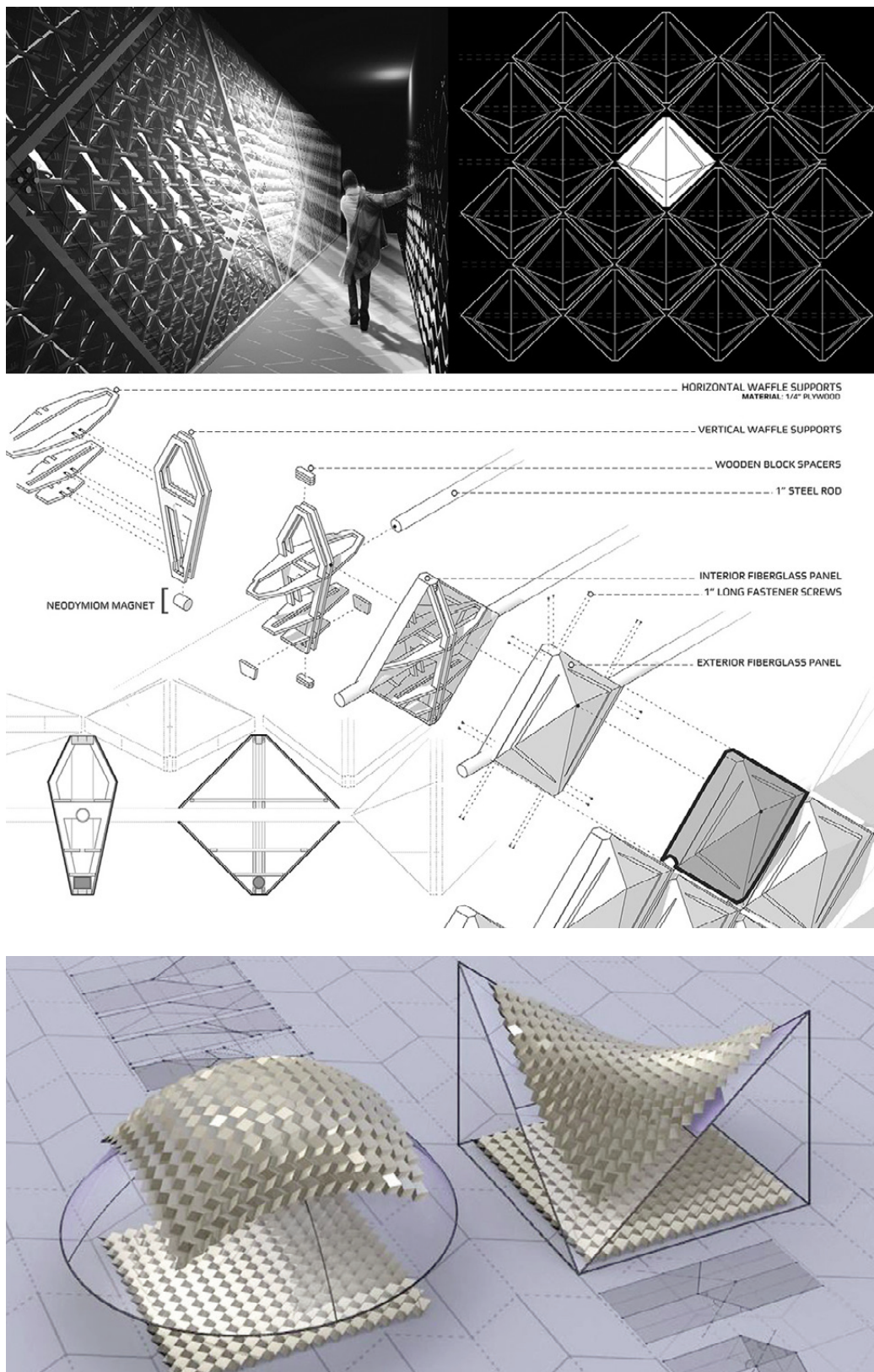


Fig. 11 | Responsive Façade (2020), designed by Boutros Bou-Nahra (source: boutrosbounahra.com).

Fig. 12 | Miura surface pattern pulled to two target surfaces (source: Tsiamis, Oliva and Calvano, 2018).

scription of the current directions of development of research on the topic and a representative set of projects and experiments, the effects and prospects of the modular approach in adaptive architecture are highlighted.

Adaptive architecture | The concept of adaptive architecture was introduced in the 1970s by Nicholas Negroponte to denote a type of architecture that possesses the ability to change in real-time to respond to complex and changing environmental conditions: «[...] responsive, sometimes called adaptable, or reactive, means the environment is taking an active role, initiating to a greater or lesser degree changes as a result and function of complex or simple computations» (Negroponte, 1975, p. 132). Tillmann Klein of TU Delft argues that adaptive architecture «[...] not dissimilar to Nature, it responds dynamically to change» (cited in Mazzucchelli, 2018, p. 79). The scholarly debate captures this analogy with the natural world and highlights how adaptive architecture, inspired by the biomimetic approach in technological research and design (Benyus, 1997; Jeronimidis and Gruber, 2012), conceives of a building as a system capable of performing multiple functions by virtue of its ability to self-organize as a self-poietic biological organism (Maturana and Varela, 1985).

While Negroponte already envisioned adaptive architecture as the result of the integration of computing power and technological capacity, in recent decades, the availability of devices and technologies for monitoring and control, such as sensor technology, Internet of Things (IoT), Building Management System (BMS), Artificial Intelligence (AI) – along with sophisticated actuator devices, whether electrical, pneumatic or chemical-physical, materialises the prefigured scenarios (d'Estrée Sterk, 2005), resulting in a cognitive, interactive and complex architecture.

Computational tools anticipate the responsive capability of architecture right from the design phase. The predictive capacity of Computational Design based on parametric-algorithmic modelling and simulation, implemented with Building Information Modeling, Big Data and Data Exchange (Davino and Bassolino, 2019), is able to describe the performance level of the adaptive architectural organism by capturing the complexity of the relationships between the building-plant system and users.

Environmental actions, performance of envelope technology systems, characteristics of energy generation, lighting and indoor climate control devices, and even user behaviour patterns (Energy Efficiency Based on User's Behaviour) can be considered to describe the most energy-efficient scenarios. In summary, «[...] the search for an interaction between building, external environment and user, can be a powerful knowledge tool» (Andaloro, 2021, p. 83) for optimising the operating models of adaptive architecture.

The complexity of adaptive systems | The high level of technological integration gives adaptive architecture a considerable degree of complexity, because of the multiplicity of relationships es-

tablished among the interacting parts that constitute its articulation and the variability of the functions entrusted to them. Systemic thinking interprets complexity as a characteristic of a system, conceived as an organic and structured aggregate of mutually interacting parts, by virtue of which the system's behaviour is not determined, reductively, by that of the individual constituent parts but depends on the manner of their interaction. Ciribini (1979, 1984) highlights how the interconnection between the parts of a complex system determines its structure, specifying that its fundamental characteristics are wholeness, transformation and self-regulation, which give rise, in architecture, to adaptive complex systems, for which the laws of homeostasis and feedback apply.

The epistemology of complexity, which finds its rationalisation in the work of Morin (1985), owes its premises to the late nineteenth-century studies of Poincaré (1902, 1905, 1909; Toscano, 2008) and those, in the first half of the twentieth century, of mathematicians and physicists such as Hadamard (1921), Schrödinger (1926a, 1926b) and Andronov (Andronov, Vitt and Khaikin, 1966). Decisive contributions to complex thinking were made by Bogdanov's Tectology (Rispoli, 2012), the cybernetics of Wiener (1948), von Foerster (2003) and Weaver (1948) and, later, Prigogine's (1993) studies of thermodynamics, which soon turned to the examination of adaptive systems in multiple domains, including the ecological one, grasping the plurality of

nonlinear relationships among the parts of natural systems and the tendency to enact autopoietic self-organising processes.

Self-organisation is generally understood as a form of system development through ordering and limiting influences, coming from the system's constituent elements, that allow it to reach a greater level of complexity. Hofstadter (1985) describes self-organisation as the composition of coherent totality from dispersed parts, while Capra (2015) highlights its nonlinearity; De Toni and Comello (2005), on the other hand, highlight its ability to confer robustness and resilience to a system.

The multiplicity of the constituent parts of a complex system and the variability of mutual influences (in the sense of frequency of change over time), either in being or in power, since the structure of a system is also multiplicity of possible interactions (Piaget, 1978), dictate the application of strategies for managing complexity. A technological system can benefit from the modular articulation of its structure (both in its logical dimension and physical explicitness) as a strategy for managing its inherent complexity. In a system, in the face of the increased degree of complexity produced by self-organisation, modularity represents a tool for finding solutions of greater efficiency and effectiveness.

Modularity for complexity management | The Law of Necessary Variety, theorised by William Ross Ashby (1957) as part of his studies of cyber-

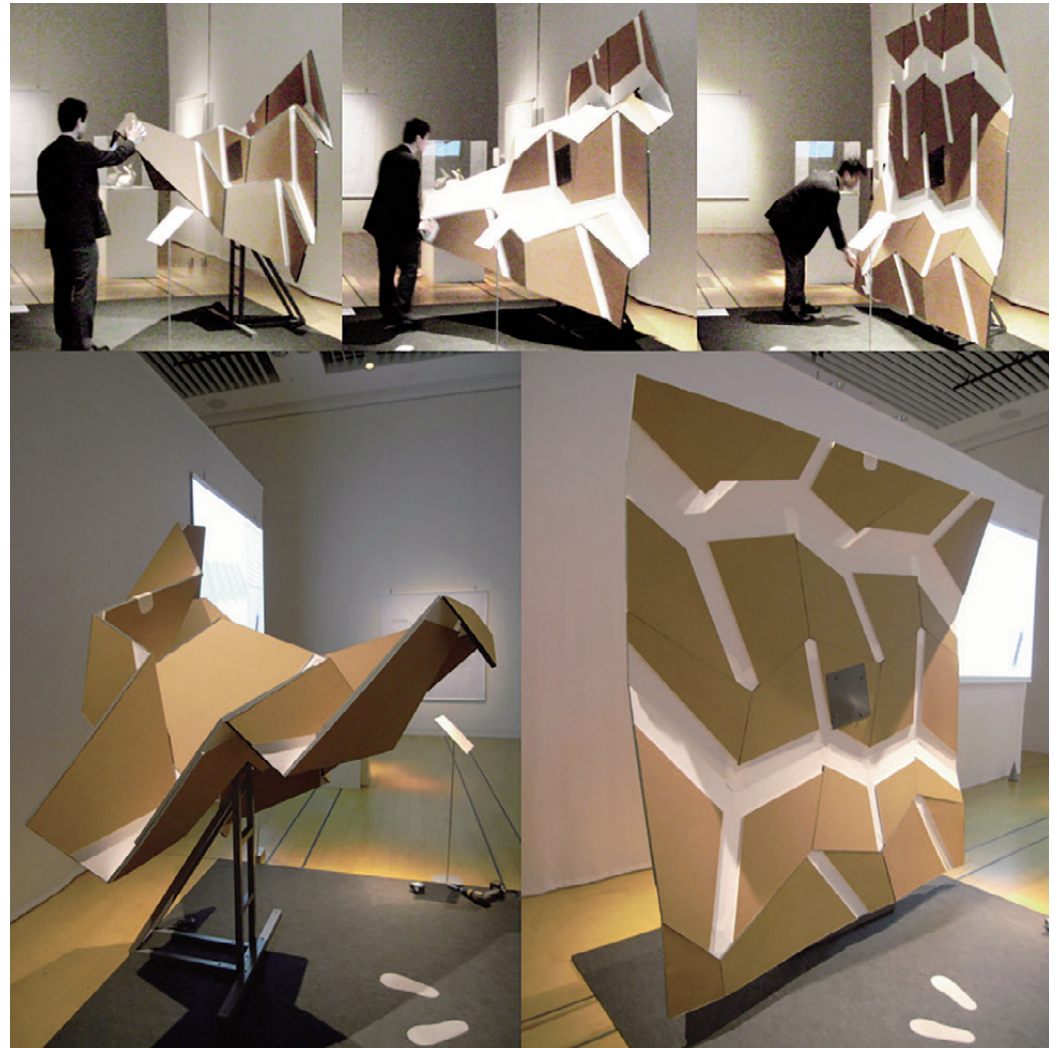


Fig. 13 | Rigid-Foldable Thick Origami (2011), designed by Tomohiro Tachi (source: Tachi, 2011).

netics and complex systems, states that for every complex system that governs another, the more extensive system must have a level of complexity comparable to the governed system. In other words, control is possible only if the governed system possesses variety and flexibility equal to or greater than the governed complex system. This leads to two equivalent but opposed strategies: either increase the complexity of the regulating system or reduce that of the governed system. The result is the advantageousness of decomposing a complex system, which is difficult to manage, into a plurality of components of lower complexity in order to make its control and management easier (Salingaros, n.d.). Such decomposition gives rise to modularity, which, in the context of the pro-

ject, can be called «[...] a very general set of principles for managing complexity» (Langlois, 2000, p. 19).

The modular approach consists of subdividing the structure of a complex system into disjointed but coherent and interdependent logical or functional units – called modules – distinctly identified and characterised by a manageable level of complexity. Modules, through their mutual relationships, always refer back to a higher structure, resulting from the combination of the parts; therefore, modularity is never ‘closed’, in that the structure can be indefinitely extended; moreover, the possibility of establishing relationships between different structures underscores the open character of modularity. Modularity is not an abstraction:

there is evidence of it everywhere, especially in Nature, as it represents how, in the face of ecosystem complexity, the living explicates self-organisation through recombination and adaptation of functional patterns (Tucci, 2017).

In 1917, Thompson (1992), with his book entitled *On Growth and Form*, publicised his studies conducted using analytical methods on natural processes relating to the creation of forms, highlighting how the mathematical rules governing the growth phenomena of living organisms are based on regularity and modularity. In morphogenetic processes, plants and animals tend to develop according to mathematical successions and recursive geometric patterns that can be traced back to the Fibonacci number succession and the golden section. The development of the number of bracted spirals on a pine cone (Fig. 1), the arrangement of seeds in the stamen of the sunflower and the growth of the calcareous shell of the nautilus (Fig. 2) follow the Fibonacci succession and a modular and scalar recursiveness, demonstrating how in Nature the concept of modularity pertains mainly to principles of self-organisation and self-regulation according to patterns ascribable to a purely logical domain, in which the rule governing complexity exceeds the precise spatial, temporal and material manifestation.

Thompson’s thought has profoundly influenced the work of scholars and architects, from Frei Otto to Norman Foster, Toyo Ito to Nicholas Grimshaw¹. Indeed, even an architecture can be conceived by emulating the optimisation processes enacted by living systems (Tucci and Carlo Ratti Associati, 2023) and can be interpreted as a modular organism that can be decomposed into several interacting units. Modularity can shape the project from its earliest stages: from its conception, technological specification, and construction to management, modularity, by simplifying its complex phenomenology, makes possible the concretisation of architecture.

Modularity in adaptive architecture | A modular approach in adaptive architecture results in the use of modules with varying configurations and functions but formally and unitarily defined and interrelated, so that each module constitutes a homogeneous and unified part of the same structure, a part of the whole capable of pursuing specific goals. Although presenting a complex articulation, the components of a modular structure are nevertheless easily manageable and more controllable and responsive to the plurality of needs. In fact, modular articulation allows a system to graduate functions and performance of modules to move from simple to more complex tasks, moving from a limited level of autonomy to a high level of complexity.

The extent of modular articulation and the degree of interrelation between modules influence specific aspects of the system. A markedly modular system composed of a considerable number of modules is undoubtedly easier to maintain and expand but manifests a high inherent complexity resulting from the need to manage coordination be-

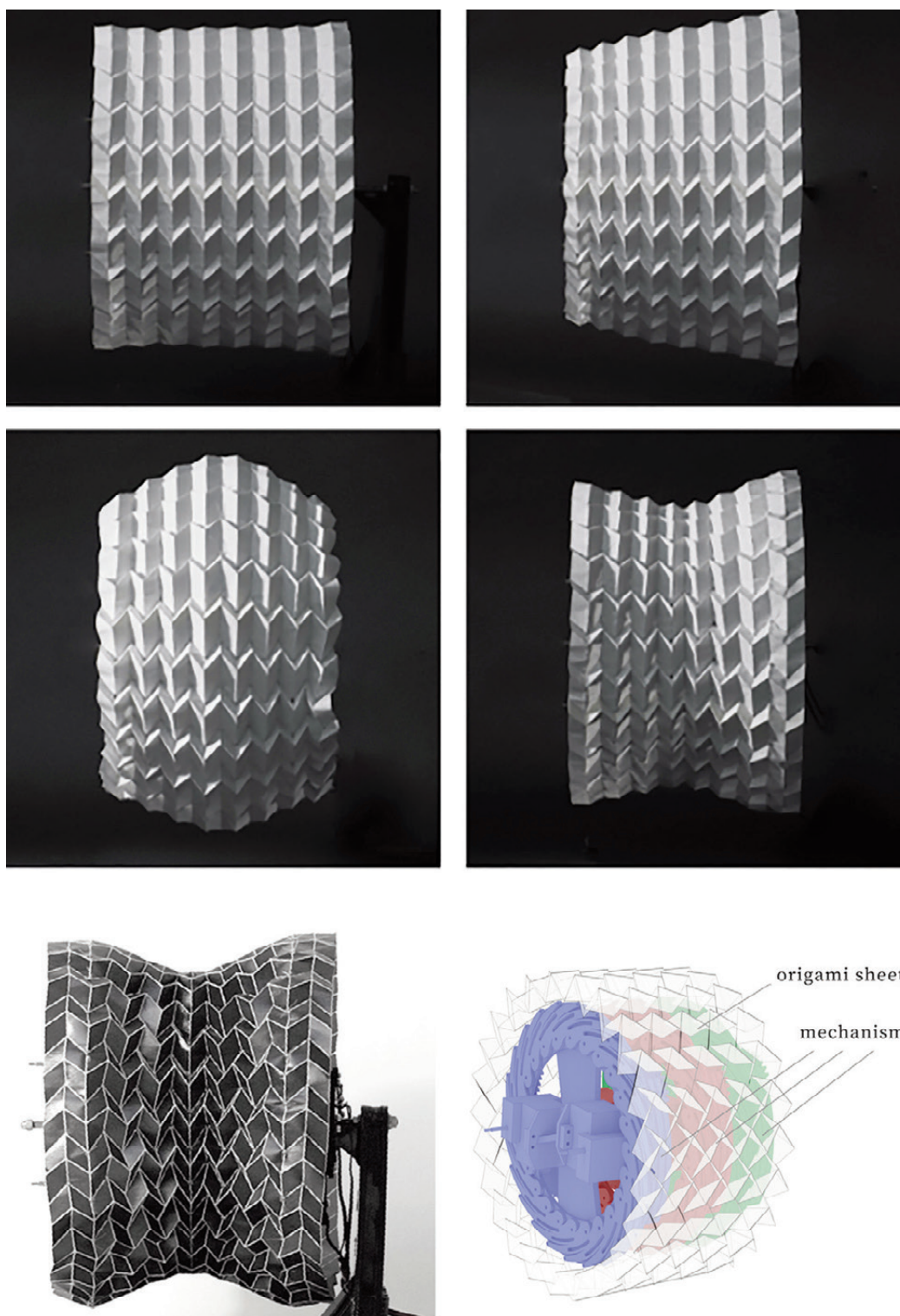


Fig. 14 | Ex-Chochin (2022), designed by Mai Ohira, Soya Eguchi, Claire Okabe and Hiroya Tanaka (source: Ohira et alii, 2022).

tween modules; in contrast, a limitedly modular system composed of a small number of modules is more difficult to maintain but coordination between modules is simpler. These considerations invite the evaluation of the use of specific components through the degree of separability and aggregability of the components of a modular system, their level of interdependence and the rules pertaining to the system's overall architecture (Sorrenti, 2017).

The advantages of applying the modular approach in architecture are manifold. From a compositional point of view, it is possible to characterise the architectural object by virtue of multiple solutions obtained from the combination of a finite number of components, while from a technological point of view, it is possible to modulate solutions due to the complexity of functions and the multiplicity of defined requirements. From the production point of view, the supply of limited varieties of components results in the possibility of achieving lower production costs, while from the management point of view, the homogeneity and interchangeability of modules facilitate repair and replacement processes, reducing maintenance costs over time.

In contemporary architecture, numerous projects highlight how the modular approach is essential for realising adaptive envelope systems in terms of installation, operation, performance control, maintainability and architectural figurability. The operation of the southern façade of the Institut du Monde Arabe (1987) in Paris, by Jean Nouvel, is based on the modular repetition of mechanical diaphragms, inspired by the human eye, to which the control of natural lighting in interior spaces is delegated.

The sun-shading system of the Al-Bahar Towers (2012) in Abu Dhabi by Aedas Architects and Arup features a honeycombed articulation of modules equipped with deployable textile elements that panders to the curvilinear development of the facades; the modular approach enables the implementation of differentiated local responses proportional to the gradient of environmental stresses, simplifies maintenance and characterises the architectural image (Fig. 3). The building envelope of the Kiefer Technic Showroom in Graz, Austria (2007), by Ernst Giselbrecht, is based on the kinematics of interconnected façade modules; a solar shading, made of metal panels and implemented by mechanical devices, gives rise to a wide range of configurations (Fig. 4).

The envelope of the Media-TIC Building in Barcelona (2009; Fig. 5), by Enric Ruiz Geli, was developed through a morphogenetic process of transforming a modular grid (Fig. 6) that composes a weave of inflatable ethylene tetrafluoroethylene (EFTE) cushions that allow light to pass through while absorbing its thermal component (Albiñana, 2011). A network of integrated and independent sensors governs pneumatic devices that, by insufflating air into the cushions, change

their shielding and insulating capacity, resulting in a responsivity commensurate with the level of local solar radiation that contributes to greater overall system efficiency.

Tessellations, origami and kirigami: modularity research in adaptive architecture | The frontier of adaptive envelope research resorts to the analytical methodology of mathematics and geometry to achieve technological advances and novel formal solutions. In geometry, repeating a figure on a plane or spatial surface through variations such as rotation, reflection, alternation, translation or scalar transformation gives rise to a modular configuration called a 'pattern'. The simplest type of pattern is 'tessellation', i.e. the infinite repetition of one or more geometric figures on a surface, without gaps or overlaps.

Tessellations can generally take plane geometric figures such as triangles, squares and hexagons as a module. The equilateral triangle is an excellent modular figure that can be employed in tessellations because, on the one hand, it is able to occupy an entire surface without the aid of other polygons and, on the other hand, the repetition of the triangular module allows the creation of different geometric figures such as the rhombus, trapezoid, hexagon or star polygons.

The tessellations that are obtained by isometric transformations 'rigid' such as translation and rotation are called regular (Fig. 7). Non-regular or aperiodic tessellations – i.e., such that no rotation or translation is able to move the tessellations lo-

cally on each other – include the random ones of Lejeune Dirichlet (1850) and Delaunay (1934) or the irregular ones of Wang (1961), Robinson (1971) or Penrose (1974), discovered in 1974 and based on the golden section. In 2023, mathematician David Smith (Smith et alii, 2023) discovered the aperiodic tessellation 'ein stein', characterised by a single shape whose combinations generate a pattern that never repeats (Fig. 8).

Nature offers numerous examples of tessellations, including the wing surface and eyes of insects, the honeycomb of bees, the single-cell tissue of the onion, the texture of the leaf blade, the fractures of dry clay soil, as well as some animal and plant cell structures (Fig. 9), demonstrating that the recursiveness of certain geometric principles and morphologies, although differentiated by parameters and limiting factors, cuts across multiple domains and is generally motivated by biological, chemical and physical factors and interaction with the external environment.

The solar shading system at Henning Larsen Architects' Kolding Campus in Grønborg, Denmark in 2014 is an example of the application of triangular tessellation to adaptive architecture design (Fig. 10). In the Responsive Façade envelope system devised by Boutros Bou-Nahra², based on a tessellation of squares, polymerised fibre-glass panels rotate on an axis adjusting solar gain by means of mechanical actuators (Fig. 11).

The survey of the state of the art on the subject of adaptive architecture highlights that research is moving toward methodological deepen-

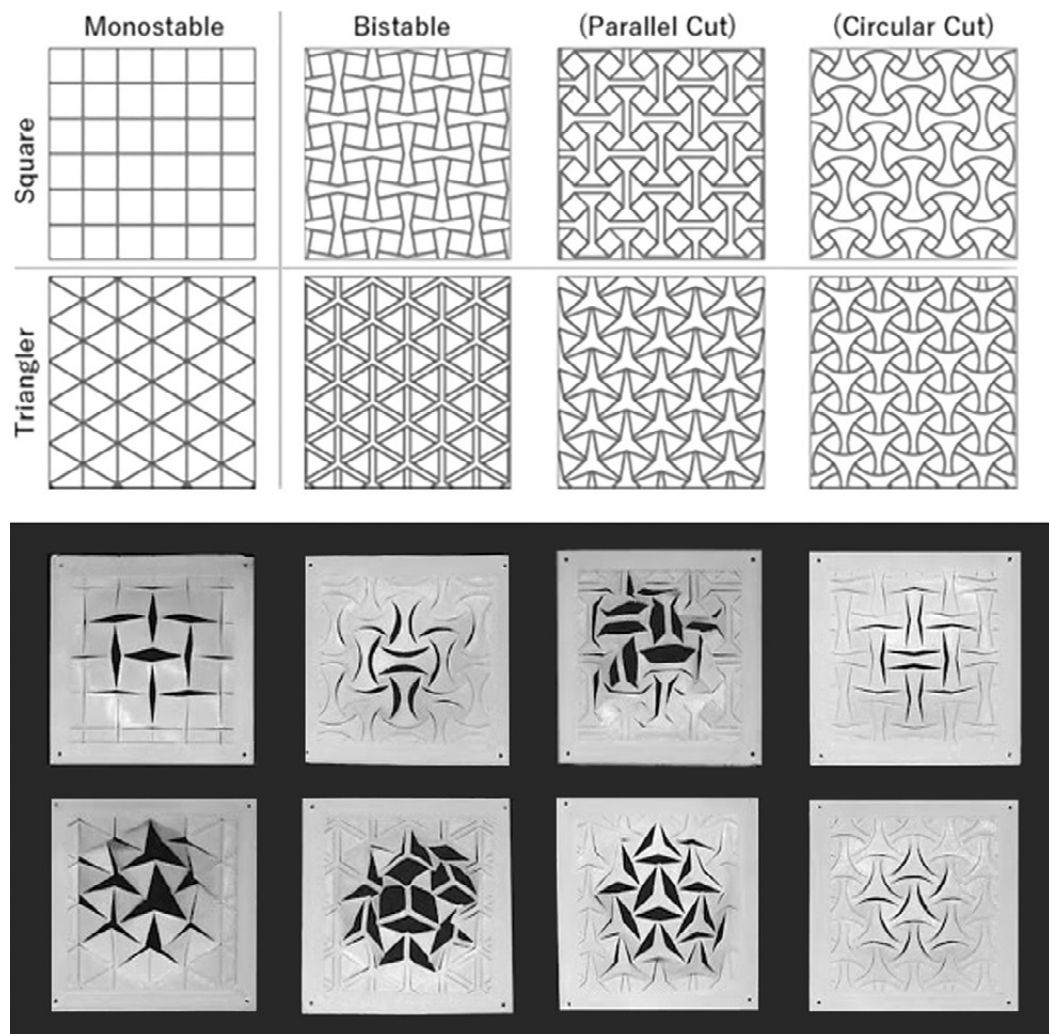


Fig. 15 | Breathing Façade (2019), designed by Hitomi Kuboki, Hiroya Tanaka, Sadatoshi Ohno, Keitarou Sugita, Naho Takayanagi, Nanako Nakajima, Kyohei Yuasa and Takatoshi Nakatani (source: youtube.com; credits: H. Tanaka, 2019).

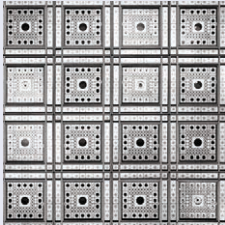
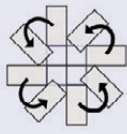

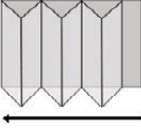

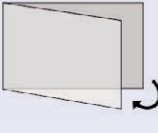

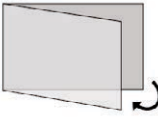
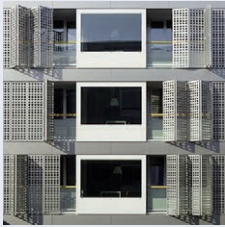
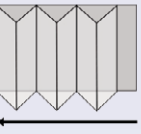
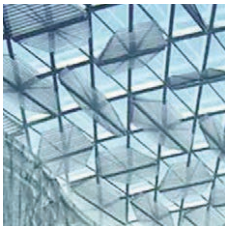
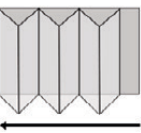
Next pages

Tab. 1 | Projects and research on the adaptive envelope in architecture (credits: The Authors, 2023).

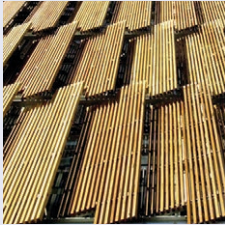
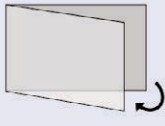
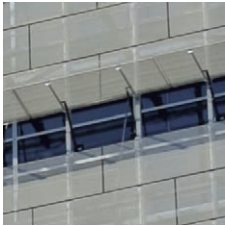
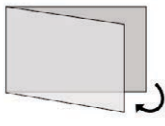

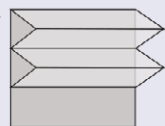
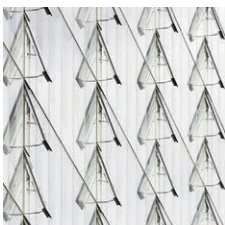
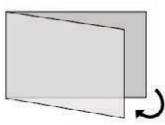
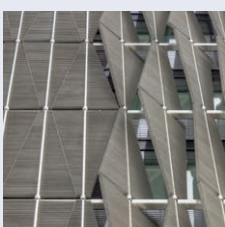
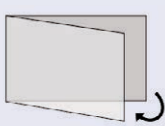

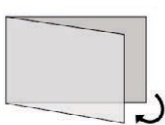
MODULARITY IN ADAPTIVE ARCHITECTURE

Multi-Criteria assessment of case studies

Architectural projects

N°	Project Designer(s)	Place	Year	Image	Functions	Modular pattern	Motion type	Type of actuation	Type of control	Type of response	Functional complexity	Structural complexity
1	Institut du Monde Arabe Jean Nouvel Pierre Soria Gilbert Lezénés Architecture Studio	Paris France	1987		Daylight control Heat gain control	Modular grid of squares	 Scaling based on 2D rotation	Mechanical hydraulic	Centralized	Integral	lower	higher
2	Biocatalysis Lab Building Technical University of Graz Ernst Giselbrecht	Graz Austria	2004		Daylight control Heat gain control	Modular grid of rectangles	 Horizontal folding	Mechanical motor-based	Modular	Modular	lower	average
3	Articulated Cloud Pittsburgh Children's Museum Ned Kahn Studios	Pittsburgh USA	2004		Daylight control Heat gain control	Modular grid of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Physical (wind)	None	Modular	lower	lower
4	Devonshire Building University of Newcastle Dewjoc Architects	Newcastle United Kingdom	2004		Daylight control Heat gain control	Tassellation of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Integral	lower	average
5	Ljubljana University Housing Bevk Perovic Arhitekti	Ljubljana Slovenija	2005		Daylight control Heat gain control	Modular grid of rectangles	 Horizontal folding	Mechanical motor-based	Centralized	Modular	lower	average
6	Madrid's City of Justice Foster + Partners	Madrid Spain	2006		Daylight control Heat gain control	Tassellation of hexagons	 Horizontal folding	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average

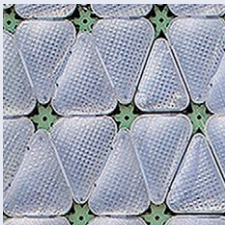
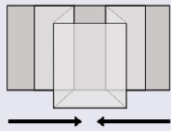


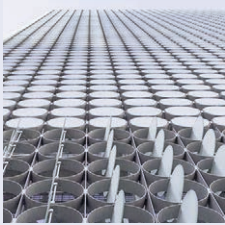




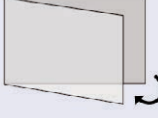


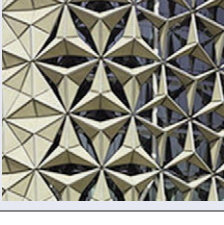

MODULARITY IN ADAPTIVE ARCHITECTURE
Multi-Criteria assessment of case studies
Architectural projects

N°	Project Designer(s)	Place	Year	Image	Functions	Modular pattern	Motion type	Type of actuation	Type of control	Type of response	Functional complexity	Structural complexity
7	Council House 2 Building Mick Pearce Design	Melbourne Australia	2006		Daylight control Heat gain control	Tassellation of polygons	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Integral	lower	average
8	Federal Building Brandon Welling Jon Ghera Smith Group	San Francisco USA	2007		Daylight control Heat gain control	Modular grid of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Integral	lower	average
9	Kiefer Technic Showroom Ernst Giselbrecht Partner ZT GmbH	Graz Austria	2007		Daylight control Heat gain control	Modular grid of rectangles	 Vertical folding	Mechanical motor-based	Centralized	Modular	lower	average
10	Manitoba Hydro Palace Smith Carter Architects & Engineers	Manitoba Canada	2009		Heat gain control Ventilation	Modular grid of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average
11	Thyssenkrupp Q1 Head Quarter Chaix & Morel et Associés JSWD Architekten	Essen Germany	2010		Daylight control Heat gain control	Tassellation of triangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical motor-based	Centralized	Modular	lower	average
12	KfW Westarkade Sauerbruch Hutton Hamiltons Laboratory Taghaboni	Frankfurt Germany	2010		Daylight control Heat gain control Thermal insulation Ventilation	Origamic tassellation	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical motor-based	Centralized	Modular	higher	average

MODULARITY IN ADAPTIVE ARCHITECTURE

Multi-Criteria assessment of case studies





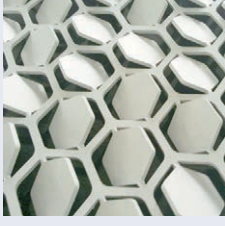

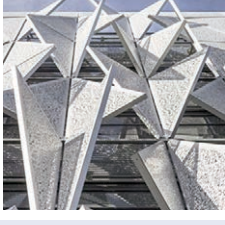

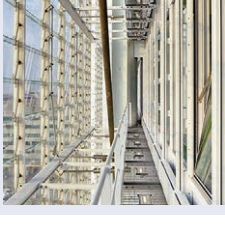

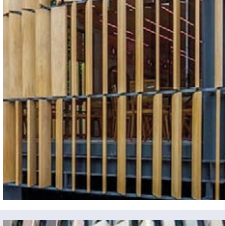

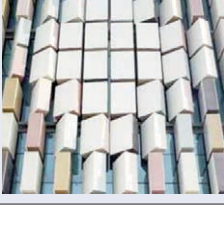

Architectural projects

N°	Project Designer(s)	Place	Year	Image	Functions	Modular pattern	Motion type	Type of actuation	Type of control	Type of response	Functional complexity	Structural complexity
13	Media-TIC Building Enric Ruiz Geli	Barcelona Spain	2010		Daylight control Heat gain control Thermal insulation	Tassellation of triangles	 Deformation	Mechanical hydraulic	Modular	Modular	average	average
14	Kuggen Building Chalmers University of Technology Gert Wingardh Jonas Edblad	Göteborg Sweden	2011		Daylight control Heat gain control	Origami tassellation	 One axis rotation of the whole envelope	Mechanical motor-based (railtrack)	Centralized	Integral	lower	higher
15	Building 100 Royal Melbourne Institute of Technology Gert Wingardh Jonas Edblad	Melbourne Australia	2012		Daylight control Heat gain control	Modular grid of disks	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical motor-based	Centralized	Modular	average	average
16	One Ocean Pavilion Expo Yeosu 2012 Soma Architects	Yeosu South Korea	2012		Daylight control Heat gain control Ventilation	Modular grid of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical hydraulic	Centralized	Integral	average	average
17	Moving Landscapes Matharoo Associates	Ahmedabad India	2012		Daylight control Heat gain control	Modular grid of squares	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average
18	Energy & Environment Innovation Building Yoshiharu Tsukamoto	Tokyo Japan	2012		Daylight control Heat gain control Energy production	Modular grid of squares	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Integral	average	higher
19	Al Bahr Towers Aedas Architects ARUP Group	Abu Dhabi UAE	2012		Daylight control Heat gain control Ventilation	Origami tassellation	 Multi-axis rotation	Mechanical	Centralized	Modular	average	higher

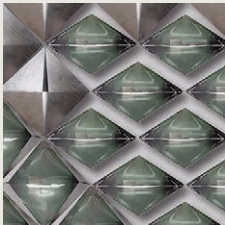
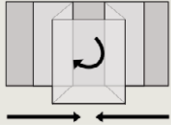



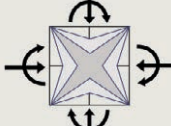

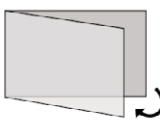


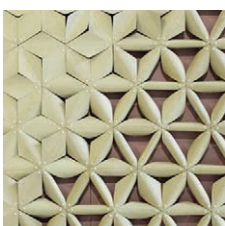
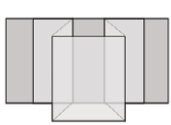
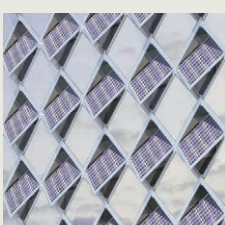

MODULARITY IN ADAPTIVE ARCHITECTURE

Multi-Criteria assessment of case studies


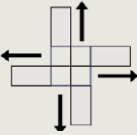
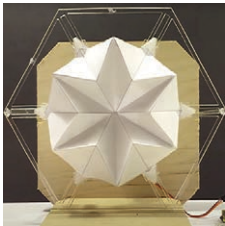


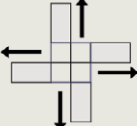
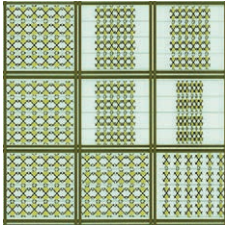


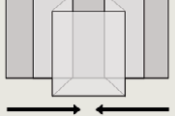
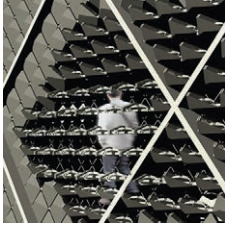


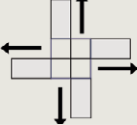
Architectural projects

N°	Project Designer(s)	Place	Year	Image	Functions	Modular pattern	Motion type	Type of actuation	Type of control	Type of response	Functional complexity	Structural complexity
20	Bio Intelligent Quotient (BIQ) House Splitterwerk Arup Engineers Colt Int. GmbH SSC GmbH	Hamburg Germany	2013		Daylight control Heat gain control Ventilation Energy production Air depollution	Modular grid of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical Biological-integrated	Centralized	Modular	higher	higher
21	Situla Complex Bevk Perovic	Ljubljana Slovenija	2013		Daylight control Heat gain control	Modular grid of rectangles	 One-axis sliding	Mechanical	Modular	Modular	lower	average
22	Blaauwklakenblok Angie Abbink Chris Kabel	Amsterdam The Netherlands	2013		Daylight control Heat gain control	Modular grid of hexagons	 One-axis rotation vertical/horizontal	Physical (wind)	None	Modular	lower	lower
23	Kolding Building University of Southern Denmark Henning Larsen Architects	Grønborg Denmark	2014		Daylight control Heat gain control	Tasselation of triangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average
24	Intesa-SanPaolo Headquarters Renzo Piano Building Workshop	Turin Italy	2014		Daylight control Ventilation	Modular grid of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average
25	Restaurant Bossa Rosenbaum and Muti Randolph	São Paulo Brazil	2015		Daylight control Heat gain control	Tasselation of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average
26	India Pavillion Expo Dubai 2020 C.P. Kukreja Architects	Dubai UAE	2020		Daylight control Heat gain control	Tasselation of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average

Research and prototypes

N°	Research / prototype	Place	Year	Image	Functions	Modular pattern	Motion type	Type of actuation	Type of control	Type of response	Functional complexity	Structural complexity
	Designer(s) Institute											
27	Sonomorph Sound Responsive Wall Natasia Sljivancanin Cornell University	New York USA	2009		Noise control Lighting	Modular origami pattern	 Physical properties and one-axis rotation	Mechanical motor-based	Centralized	Modular	average	higher
28	Rigid-Foldable Thick Origami Tomohiro Tachi University of Tokyo	Tokyo Japan	2011		Daylight control Heat gain control	Origamic tassellation	 Multi-axis rotation	Mechanical	Not applicable	Not applicable	lower	average
29	Square-Tic Façade Kamil Sharaidin Royal Melbourne Institute of Technology	Melbourne Australia	2014		Daylight control Heat gain control	Origamic tassellation of squares	 Sliding and retracting	Mechanical	Not applicable	Not applicable	lower	average
30	Integrated Concentrating Solar Façade (ICSF) Anna Dyson Matt Gindlesparger Peter Stark et alii Yale School of Architecture	New Haven USA	2015		Daylight control Heat gain control Energy production	Modular pattern of prisms	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical motor-based	Centralized	Integral	higher	higher
31	SoRo-Track Bratislav Svetozarevic Zoltan Nagy Johannes Hofer et alii ETH Zurich	Zürich Switzerland	2015		Daylight control Heat gain control Energy production	Modular grid of squares	 Two-axis rotation vertical and horizontal	Mechanical hydraulic, motorized	Centralized	Modular	average	higher
32	Water-Reactive Envelope Chao Chen Royal College of Art	London United Kingdom	2015		Rainwater protection	Tassellation of diamonds	 Deformation due to physical properties	Physical-chemical	None	Modular	lower	lower
33	Adaptive Solar Skin Daniel Raznick Artemis Hanson Christopher Brenny Daniel Raznick Arch.	Minneapolis USA	2016		Daylight control Heat gain control Energy production	Modular grid of squares	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical motor-based	Not applicable	Not applicable	average	higher

Research and prototypes

N°	Research/prototype Designer(s) Institute	Place	Year	Image	Functions	Modular pattern	Motion type	Type of actuation	Type of control	Type of response	Functional complexity	Structural complexity
34	Shapeshifting Material Johannes Overvelde Katia Bertoldi et alii Harvard University	Cambridge USA	2016		Multi-purpose adaptability	Metamaterial based on origamic modular pattern	 Scaling based on translation	Electro-actuated	Not applicable	Not applicable	Not applicable	average
35	Responsive Origami Mostafa Alani Brian Leounis Clemson University	Clemson USA	2017		Daylight control Heat gain control	Origamic tassellation	 Multi-axis rotation	Mechanical motor-based	Not applicable	Modular	average	higher
36	Heat-Actuated Auxetic Façade Elnaz Tafrihi Bailey Amira Abdel-Rahman University of California Massachusetts Institute of Technology	Berkely-Cambridge USA	2018		Daylight control Heat gain control	Auxetic metamaterial based on modular pattern	 Scaling based on translation	Physical (heat)	Not applicable	Integral	lower	lower
37	Scissorsnet Maziar Asefi Sepide Shoaee Tabriz Islamic Art University	Tabriz Iran	2018		Daylight control Heat gain control	Pantographic spatial tessellation of diamonds	 Contracting and expanding	Mechanical	Not applicable	Not applicable	lower	average
38	Breathing Façade Reactive Wall Hitomi Kuboki Hiroya Tanaka Sadatoshi Ohno et alii Keyo University	Tokyo Japan	2019		Ventilation	Modular kirigami pattern	 Deformation due to geometrical properties	Physical (air pressure)	None	Modular	lower	lower
39	Responsive façade Boutros Bou-Nahra Boutros Bou-Nahra Architect	Miami USA	2020		Daylight control Heat gain control	Modular grid of prisms	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical motor-based	Modular	Modular	lower	higher
40	Ex-Chochin Mai Ohira Soya Eguchi Claire Okabe Hiroya Tanaka Keyo University	Tokyo Japan	2022		Multi-purpose adaptability	Modular origamic pattern	 Scaling based on translation	Mechanical motor-based	Centralized	Integral	Not applicable	higher

ing of tessellation techniques, such as folding surfaces in three dimensions, in analogy with the Oriental technique of origami, in order to obtain novel geometric configurations, give rise to new kinematics and simplify the structural articulation of responsive technological systems by reducing their wear and tear components.

Since the 1970s, the growing research interest in origami – because of their ability to give rise to tessellations that fit free-form surfaces (Tsiamis, Oliva and Calvano, 2018; Fig. 12) and the kinematics they are capable of explicating – has given impetus to so-called origami architecture (Rodonò, 2022). Over time, the principles behind origami have been used to develop unfoldable structures, reconfigurable structures, and structures with high mechanical performance. More recently, Tomohiro Tachi (2011) of the University of Tokyo developed the Rigid-Foldable Thick Origami demonstrator, an enclosure component composed of a set of rigid panels joined at their perimeter with flexible material to generate kinetic behaviour (Fig. 13), while Ohira, Eguchi, Okabe and Tanaka (2022) of Keio University developed the Ex-Chochin demonstrator, an adaptive envelope made according to an origami tessellation inspired by the Miura pattern, capable of changing shape and texture through the action of mechanical actuators and generating a wide range of geometric configurations (Fig. 14).

Several studies and experiments also apply the technique of kirigami, a variant of origami, in which carving is practiced in addition to folding. Breathing Façade (Kuboki et alii, 2019) is a modular adaptive envelope system inspired by fish gills composed of shape-memory auxetic polymer metamaterial membranes in which notches have been made to trigger spontaneous ventilation between the internal and external environments (Fig. 15). Finally, research such as that conducted by Prof. Overvelde's team at Harvard University demonstrates that components made of auxetic metamaterials based on modular origami joints, by virtue of a shape-memory 'programmable' structure, can produce kinematics without the use of mechanical joints, thus simplifying manufacturing, installation and maintenance processes (Overvelde et alii, 2017).

Acknowledgements

This paper is the result of a common reflection of the Authors.

Notes

1) In particular, we refer to Otto Frei's designs of the German Pavilion at the Montreal Expo (1967), the Olympic Stadium in Munich (1972) and the Japanese Pavilion at the Hanover Expo (2000), designed in collaboration with Shigeru Ban, Toyo Ito's design of the Grin Grin Park in Fukuoka (2009), Nicholas Grimshaw's designs of Waterloo Station in London (1993), the Eden Project in St. Blazey, Cornwall (2000), the Penang International Airport in Malaysia (2018), and Norman Foster's designs of The Gherkin Tower in London (2004) and the Great Court of the British Museum in London (2011).

2) For more information on Bou-Nahra's Responsive Façade, see the webpage: boutrosbounahra.com/responsive-façade [Accessed 14 October 2023].

Concluding reflections on modular approach and adaptive architecture

The energy-environmental problem, determined by anthropogenic action on the ecosystem, prompts reflection on design methodologies and future directions of technological innovation in the built environment, the catalyst for most of the energy conversion processes supporting human activities.

New design approaches, based on observation and emulation of the adaptation processes of living beings, conceive the building organism as a system capable of self-regulation and achieving homeostatic balance with the environment to ensure satisfactory levels of comfort and reduce energy consumption, giving rise to adaptive architecture. With this in mind, the paper presents a survey of the state of the art of adaptive architecture that, by collecting a representative set of studies and projects, highlights the role of modularity in responsive envelope systems through the examination of aspects such as function, geometric configuration, operation, control and degree of complexity (Tab. 1).

From the observation of the reported cases, it is possible to deduce how the inherent limitations of adaptive architecture derive, first and foremost, from its complexity. This complexity is explicit in both the functional and material aspects. The multiplicity of functions demanded and the sophisticated systemic structure can give rise to incidental interference and failures that can undermine design scenarios, while the high technological articulation exposes the system to performance decay.

The modular approach, of which there is ample evidence in the optimisation and adaptation processes of complex systems in the natural domain, is a methodology that reduces the complexity of a technological system and can be applied to the design, implementation, operation and maintenance phases to achieve efficiency and effectiveness. However, one could debate certain limiting aspects of the typological character of modularity that, while freeing the project from the control of unmanageable complexity, binds it to repetitive formal and technological articulation. Nevertheless, numerous contemporary projects, beginning with those illustrated, highlight the modular approach's ability to guarantee the

expected performance levels and characterise the figurability of the adaptive architecture.

Projects, research and experimentation, making use of the possibilities offered by parametric design and advances in materials science, investigate novel applications of modularity in architecture, such as tessellations, origami, kirigami and metamaterials, resulting in new technological and formal solutions that foreshadow future developments in a multidisciplinary and multiscale research domain.

The issue of scalar applicability of modular models investigated by current research identifies two main directions for development. The first can guide research toward the study, at a small scale, of applying the modular approach to designing and producing structures of new metamaterials, including through nanotechnology. The second can steer research, at an urban scale, toward the application of modularity to adaptive city design, of which Sidewalk Lab's Toronto Waterfront Redevelopment Project (Sidewalk Lab, 2019a, 2019b), abruptly halted in 2020 due to the economic uncertainty produced by the Covid19 pandemic, is an example.

While both research directions have limitations stemming from the availability of investment, the former is more sensitive to the degree of technological maturity of production processes, while sociocultural barriers mainly condition the latter. Therefore, against the potential of the modular adaptive architecture illustrated, the development of research will depend on the propensity of public agencies and companies to support projects and experiments and the attitude of the sociocultural environment.

Finally, it is important to note that while adaptive architecture has so far been intended to respond to changing environmental conditions, in contrast, it has not been able to produce any substantial changes in human behaviour. Instead, it should be able to empower society in order to «[...] the search for an interaction between building, external environment and user, can be a powerful knowledge tool» (Ulber and Mahall, 2019, p. 103).

References

- Albiñana, M. (2011), *Media-ICT*, Actar Publishers, Barcelona. [Online] Available at: issuu.com/actar/docs/media-ict [Accessed 20 October 2023].
- Andaloro, B. (2021), "Il corpo fisico dell'architettura interattiva – Approcci scenario-based e generativo | The body of interactive architecture – Scenario-based and generative approaches", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 10, pp. 76-83. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1072021 [Accessed 11 October 2023].
- Antonini, E. (2019), "Incertezza, fragilità, resilienza | Uncertainty, fragility, resilience", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 6, pp. 6-13. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/612019 [Accessed 12 October 2023].
- Andronov, A. A., Vitt, A. A. and Khaikin, S. E. (1966), *Theory of oscillators*, Pergamon Press, London.
- Ashby, W. R. (1957), *An introduction to cybernetics*, Chapman & Hall, London.

Bellelli, F. (2022), "The fascinating world of Voronoi diagrams – A brief introduction about this ubiquitous pattern and its applications", in *Towards Data Science*, 02/04/2022. [Online] Available at: towardsdatascience.com/the-fascinating-world-of-voronoi-diagrams-da8fc700fa1b [Accessed 20 October 2023].

Benyus, J. (1997), *Biomimicry – Innovation Inspired by Nature*, Harper-Collins Publisher, New York.

Birmingham Energy Institute (2015), *Doing Cold Smarter*, University of Birmingham, Birmingham. [Online] Available at: birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/energy/policy/Doing-Cold-Smarter-Report.pdf [Accessed 14 October 2023].

Butera, F. M. (2021), *Affrontare la complessità – Per governare la transizione ecologica*, Edizioni Ambiente, Milano.

Capra, F. (2015), *La rete della vita*, BUR Rizzoli, Milano.

CIESIN, IFPRI and CIAT (2011), *Global Rural-Urban Mapping Project, Version 1 (GRUMPv1) – Urban Extents Grid*, NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Palisades, New York. [Online] Available at: doi.org/10.7927/H4GH9FVG [Accessed 14 October 2023].

- Ciribini, G. (1984), *Tecnologia e progetto – Argomenti di cultura tecnologica della progettazione*, Celid, Torino.
- Ciribini, G. (1979), *Introduzione alla tecnologia del design – Metodi e strumenti logici per la progettazione dell'ambiente costruito*, FrancoAngeli, Milano.
- Davino, G. and Bassolino, E. (2019), “Strategie di progettazione adattiva per il retrofit di edifici in risposta ai cambiamenti climatici | Adaptive design strategies for buildings’ retrofit in response to climate change”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 6, pp. 192-199. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/6182019 [Accessed 11 October 2023].
- d’Estrée Sterk, T. (2005), “Building upon Negroponte – A hybridized model of control suitable for responsive architecture”, in *Automation in Construction*, vol. 14, issue 2, pp. 225-232. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2004.07.003 [Accessed 19 October 2023].
- De Toni, A. F. and Comello, L. (2005), “Complessità e organizzazione, ovvero verso le auto-organizzazioni”, in *complexlab*. [Online] Available at: complexlab.it/Members/lucacomello/articoli/complessita-e-organizzazione-ovvero-verso-le-auto-organizzazioni [Accessed 14 October 2023].
- Delaunay, B. (1934), “Sur la sphere vide – A la mémoire de Georges Voronof”, in *Bulletin de l’Académie des Science de l’URSS*, vol. 6, pp. 793-800. [Online] Available at: mathnet.ru/php/getFT.phtml?jmid=im&paperid=4937&what=fullt&option_lang=rus [Accessed 19 October 2023].
- Friedenberg, J. (2019), “The Perceived Beauty of Regular Polygon Tessellations”, in *Symmetry*, vol. 11, issue 8, n. 984, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/sym11080984 [Accessed 20 October 2023].
- Hadamard, J. (1921), “L’Œuvre mathématique de Poincaré”, in *Acta Mathematica*, XXXVII, pp. 203-287. [Online] Available at: doi.org/10.1007/BF02392071 [Accessed 19 October 2023].
- Hofstadter, D. R. (1985), “L’architettura del Jumbo”, in Bocchi, G. and Ceruti, M. (eds), *La sfida della complessità*, Feltrinelli, Milano, pp. 274-309.
- IEA (2022), “Building Envelopes”, in *iea.org*. [Online] Available at: iea.org/reports/building-envelopes [Accessed 14 October 2023].
- Jeronimidis, G. and Gruber, P. (2012), “Has biomimetics arrived in architecture?”, in *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 7, issue 1, pp. 1-2. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1748-3182/7/1/010201 [Accessed 2 August 2023].
- Kuboki, H., Tanaka, H., Ohno, S., Sugita, K., Takayanagi, N., Nakajima, N., Yuasa, K. and Nakatani, T. (2019), “A Proposal for Reactive Wall Panel using Auxetic Patterns”, in *Proceedings of 4DFF2019*, Keio University, Tokyo. [Online] Available at: fab.sfc.keio.ac.jp/paper/files/kuboki_4dff_fin.pdf [Accessed 14 October 2023].
- Langlois, R. N. (2000), “Modularity in Technology and Organization”, in *Journal of Economic Behaviour and Organization*, vol. 49, issue 1, pp. 19-37. [Online] Available at: sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167268102000562 [Accessed 14 October 2023].
- Lejeune Dirichlet, J. P. G. (1850), “Über die Reduktion der positiven quadratischen Formen mit drei unbestimmten ganzen Zahlen”, in *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, vol. 40, pp. 209-227. [Online] Available at: http://gdz.sub.uni-goettingen.de/dms/resolveppn?PPN=GDZPPN002146894 [Accessed 19 October 2023].
- Lucarelli, M. T., Milardi, M., Mandaglio, M. and Musarella, C. C. (2020), “Fenomeni macro vs risposte micro – Approcci multiscalari nei rapporti dinamici tra involucro e contesto | Macro phenomena vs micro responses – Multi-scale approaches in the dynamic relationship between envelope and context”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 7, pp. 26-33. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/73202 [Accessed 12 October 2023].
- Maturana, H. R. and Varela, F. J. (1985), *Autopoesis and Cognition – The Realization of the Living*, D. Reidel Publishing Company. [Online] Available at: monoskop.org/images/3/35/Maturana_Humberto_Varela_Francisco_Autopoesis_and_Cognition_The_Realization_of_the_Living.pdf [Accessed 14 October 2023].
- Mazzucchelli, E. S. (2018), “L’Involucro di Edifici Complessi – Aspetti Progettuali e Costruttivi”, in *Modulo*, vol. 415, pp. 78-83. [Online] Available at: modulo.net/files/chunks/5bed911ca0d55630c4000875/5bed9165a0d55630da00084f.pdf [Accessed 14 October 2022].
- Meisner, G. (2014), “Is the Nautilus shell spiral a golden spiral?”, in *The Golden Number*, 08/02/2014. [Online] Available at: goldennumber.net/nautilus-spiral-golden-ratio/ [Accessed 20 October 2023].
- Morin, E. (1985), “Le vie della complessità”, in Bocchi, G. and Ceruti, M. (eds), *La sfida della complessità*, Feltrinelli, Milano, pp. 25-36.
- Negroponte, N. (1975), *Soft Architecture Machines*, The MIT Press, Cambridge. [Online] Available at: doi.org/10.7551/mitpress/6317.001.0001 [Accessed 14 October 2023].
- Ohira, M., Eguchi, S., Okabe, C. and Tanaka, H. (2022), “Demonstrating ex-CHOCHIN – Shape/Texture-changing cylindrical interface with deformable origami tessellation”, in *UIST ’22 Adjunct – Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Association for Computing Machinery, New York, article 57, pp. 1-3. [Online] Available at: doi.org/10.1145/3526114.3558626 [Accessed 14 October 2023].
- Overvelde, J. T. B., Weaver, J. C., Hoberman, C. and Bertoldi, K. (2017), “Rational design of reconfigurable prismatic architected materials”, in *Nature*, vol. 541, pp. 347-352. [Online] Available at: nature.com/articles/nature20824 [Accessed 14 October 2023].
- Penrose, R. (1974), “The role of aesthetics in pure and applied mathematical research”, in *Bulletin of the Institute of Mathematics and Its Applications*, vol. 7-8, issue 10, pp. 266-271.
- Piaget, J. (1978), *Structuralism*, Harper and Row, New York.
- Poincaré, H. (1909), *Science et méthode*, Flammarion, Paris.
- Poincaré, H. (1905), *La valeur de la science*, Flammarion, Paris.
- Poincaré, H. (1902), *La science et l’hypothèse*, Flammarion, Paris.
- Prigogine, I. (1993), *Le leggi del caos*, Laterza, Bari.
- Rispoli, G. (2012), *Dall’empirionismo alla tectologia – Organizzazione, complessità e approccio sistemico nel pensiero di Aleksandr Bogdanov*, Aracne, Roma.
- Robinson, R. M. (1971), “Undecidability and Nonperiodicity for Tilings of the Plane”, in *Inventiones Mathematicae*, vol. 12, issue 3, pp. 177-209. [Online] Available at: doi.org/10.1007/BF01418780 [Accessed 20 October 2023].
- Rodonò, G. (2022), *Tecnologia dei componenti cinetici per l’architettura – Origami e superfici pieghevoli*, Edicom Edizioni, Monfalcone.
- Rogers, R. (1998), *Cities for a Small Planet*, Basic Books, New York.
- Salingaros, N. A. (n.d.), “La Legge della Varietà Necessaria e l’ambiente costruito”, in *La Direzione | Rivista dell’Innovazionismo*. [Online] Available at: ladirezione.it/la-legge-della-variet%C3%A0-necessaria-e-lambiente-costruito-dinikos-a-salingaros/ [Accessed 20 October 2023].
- Schrödinger, E. (1926a), “Quantisierung als Eigenwertproblem”, in *Annalen der Physik*, vol. 384, issue 4, pp. 361-376. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1002/andp.19263840404 [Accessed 19 October 2023].
- Schrödinger, E. (1926b), “Quantisierung als Eigenwertproblem”, in *Annalen der Physik*, vol. 81, pp. 109-139. [Online] Available at: gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k15383q/f117.item [Accessed 19 October 2023].
- Sidewalk Labs (2019a), *Toronto Tomorrow – A new approach for inclusive growth*, vol. 1. [Online] Available at: storage.googleapis.com/sidewalk-labs-com-assets/MIDP_Volume1_printerfriendly_e108cdf1c6/MIDP_Volume1_printerfriendly_e108cdf1c6.pdf [Accessed 22 October 2023].
- Sidewalk Labs (2019b), *Toronto Tomorrow – A new approach for inclusive growth*, vol. 2. [Online] Available at: storage.googleapis.com/sidewalk-labs-com-assets/MIDP_Volume2_printerfriendly_722347160d/MIDP_Volume2_printerfriendly_722347160d.pdf [Accessed 22 October 2023].
- Smith, D., Myers, J. S., Kaplan, C. S. and Goodman-
- Strauss, C. (2023), “A chiral aperiodic monotile”, in *ArXiv*, 28/05/2023. [Online] Available at: doi.org/10.48550/arxiv.2305.17743 [Accessed 20 October 2023].
- Sorrenti, D. (2017), *Modelli per le scelte tecnologiche*, Università C. Cattaneo LIUC, Castellanza. [Online] Available at: my.liuc.it/MatSup/2017/N75310/5.%20Modularit%C3%A0%20-%20A.A.%202017%20-%202018.pdf [Accessed 14 October 2023].
- Tachi, T. (2011), “Rigid-Foldable Thick Origami”, in Wang-Iverson, P., Lang, R. J. and YIM, M. (eds), *Proceedings of Origami 5 – Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education*, CRC Press, pp. 253-263. [Online] Available at: doi.org/10.1201/b10971-24 [Accessed 14 October 2023].
- Thompson, D. W. (1992), *On Growth and Form*, Cambridge University Press, Cambridge. [Online] Available at: doi.org/10.1017/CBO9781107325852 [Accessed 14 October 2023].
- Toscano, M. (2008), *Un pensiero complesso – Riflessioni storiche ed epistemologiche sulla scoperta del caos nell’opera di Jules Henri Poincaré | Une pensee complexe – Reflexions historiques et epistemologique sur la decouverte du chaos dans l’œuvre de Jules Henri Poincare*, Tesi di Dottorato in Antropologia ed Epistemologia della Complessità, XXI ciclo, 2007-2008, Relatori Giannetto E. and Boi L., Università di Bergamo. [Online] Available at: aisberg.unibg.it/retrieve/e40f7b84-0108-afca-e053-6605fe0aeaf2/Tesi%20Marco%20Toscano.pdf [Accessed 19 October 2023].
- Tsiamis, M., Oliva, A. and Calvano, M. (2018), “Algorithmic Design and Analysis of Architectural Origami”, in *Nexus Network Journal*, vol. 20, pp. 59-73. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00004-017-0361-9 [Accessed 14 October 2023].
- Tucci, F. (2017), “Paradigmi della Natura per Progettare Involucri architettonici | Nature’s Paradigms for Designing Architectural Envelopes”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 2, pp. 47-54. [Online] Available at: 10.19229/2464-9309/262017 [Accessed 11 October 2023].
- Tucci, G. and Carlo Ratti Associati (2023), “La tecnologia come abilitatore di un nuovo ecosistema urbano responsivo – Intervista a Carlo Ratti (CRA Studio) | Technology as an enabler of a new ecosystem responsive urbanism – Interview with Carlo Ratti (CRA Studio)”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 190-201. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12172022 [Accessed 12 October 2023].
- Ulber, M. and Mahall, M. (2019), “L’architettura adattiva come mediatrice fra gli uomini e la terra | Adaptive architecture as mediator between humans and earth”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 6, pp. 94-103. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/692019 [Accessed 12 October 2023].
- UNEP (2020), *2020 Global Status Report for Buildings and Construction – Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. [Online] Available at: globalabc.org/news/launched-2020-global-status-report-buildings-and-construction [Accessed 14 October 2021].
- UNEP (2016), *Global Status Report 2016 – Towards Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings*. [Online] Available at: globalabc.org/resources/publications/gabc-global-status-report-2016-towards-zero-emission-efficient-and-resilient [Accessed 14 October 2023].
- von Foerster, H. (2003), *Understanding Understanding – Essays on Cybernetics and Cognition*, Springer-Nature, New York. [Online] Available at: doi.org/10.1007/b97451 [Accessed 14 October 2023].
- Wang, H. (1961), “Proving theorems by pattern recognition – II”, in *The Bell System Technical Journal*, vol. 40, issue 1, pp. 1-41. [Online] Available at: doi.org/10.1002/j.1538-7305.1961.tb03975.x [Accessed 20 October 2023].
- Weaver, W. (1948), “Science and Complexity”, in *American Scientist*, vol. 36, issue 4, pp. 536-544. [Online] Available at: jstor.org/stable/27826254 [Accessed 19 October 2023].
- Wiener, N. (1948), *Cybernetics – Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Kessinger, New York.

ARTICLE INFO

Received	15 September 2023
Revised	08 October 2023
Accepted	20 October 2023
Published	31 December 2023

SISTEMI ABITATIVI MODULARI OFF-SITE

Soluzioni speditive per l'abitare da studenti

OFF-SITE MODULAR HOUSING SYSTEMS

Expeditious solutions for student residence

Oscar Eugenio Bellini, Marianna Arcieri, Maria Teresa Gullace

ABSTRACT

In un sistema universitario competitivo, le residenze per studenti rappresentano un'ineludibile infrastruttura a supporto non solo delle esigenze di ospitalità ma anche delle attività didattico-co-formative, contribuendo a promuovere concetti di indipendenza e autonomia individuale e ad attivare scambi e supporti relazionali reciproci. Per dare risposte speditive all'attuale carenza di posti alloggio è oggi possibile far ricorso a sistemi abitativi modulari prefabbricati. Avvalendosi della letteratura e di case studies, il contributo traccia l'evoluzione di questo sistema costruttivo, evidenzia limiti e potenzialità e restituisce un quadro che definisce ragioni e opportunità che potrebbero suggerire un maggiore impiego nell'housing universitario, in un momento in cui rapidità esecutiva, qualità del prodotto e rispetto dei costi realizzativi sono sempre più fattori dirimenti.

In a competitive university system, student residences represent an essential infrastructure to support not only hospitality needs but also educational and training activities, promoting concepts of independence, and fostering reciprocal relational exchanges and supports. In order to respond immediately to the current shortage of accommodation places, it is possible to use prefabricated modular housing systems. Thanks to the study of literature and case studies, this paper describes the evolution of this construction system, highlighting limits and potentials. It also provides an overview that defines the reasons and opportunities that could suggest its greater use in the university housing sector, at a time when the speed of execution, product quality and respect for costs are increasingly important factors.

KEYWORDS

residenze per studenti, prefabbricazione, innovazione di processo e di prodotto, moduli abitativi, edifici temporanei

student residences, prefabrication, process and product innovation, housing modules, temporary buildings

Oscar Eugenio Bellini, an Architect with a PhD, is an Associate Professor of Architectural Technology at the Department of Architecture, Built environment and Construction engineering (DABC) of Politecnico di Milano (Italy). He carries out research activities mainly in the field of housing. He is the Scientific Coordinator of HOME_Lab – Innovative Solutions for Student Accommodation. E-mail: oscar.bellini@polimi.it

Marianna Arcieri is a PhD Candidate in Architectural Technology at the Department of Architecture, Built environment and Construction engineering (DABC) of Politecnico di Milano (Italy). She carries out research mainly in the field of social housing and university residences. She is a member of HOME_Lab. | E-mail: marianna.arcieri@polimi.it

Maria Teresa Gullace, an Architect, is an Executive PhD Candidate in Architectural Technology at the Department of Architecture, Built environment and Construction engineering (DABC) of Politecnico di Milano (Italy). She carries out research mainly in the field of social housing and, in particular, on the issues of university housing. She is a member of HOME_Lab. | E-mail: mariateresa.gullace@polimi.it



Per un sistema universitario che mira a essere competitivo a scala internazionale le residenze per studenti rappresentano un'ineludibile infrastruttura sociale a supporto dei processi di mobilità. Oltre a favorire la riduzione dei costi della formazione, sui quali la voce 'alloggio' incide in misura determinante (Hauschildt et alii, 2021), queste infrastrutture appaiono, sul piano sociologico, come la soluzione più appropriata per promuovere l'indipendenza e l'autonomia individuale, sperimentare la dimensione comunitaria, incoraggiare il confronto con gruppi eterogenei di persone, spesso di origine e cultura differenti, e favorire rapporti relazionali reciproci. Nonostante ciò la carenza di alloggi per studenti permane un limite con il quale si stanno confrontando migliaia di universitari fuori sede; in Italia solo il 5% degli studenti ha la possibilità di essere ospitato in questa tipologia abitativa (Fig. 1; Hauschildt et alii, 2021).

Per rispondere a questa 'emergenza abitativa', è possibile ricorrere all'impiego di sistemi abitativi modulari off-site, una soluzione costruttiva efficiente e versatile, molto utilizzata nella emergency housing, e recentemente nello student housing. In questi casi il modulo progettuale si può trasformare in uno strumento di espressività creativa, capace di governare, attraverso i principi dell'industrializzazione e della prefabbricazione, molteplici aspetti di processo e di prodotto, tra i quali, per esempio, semplicità e velocità costruttiva, qualità dei livelli prestazionali, rispetto della normativa ambientale e antisismica, controllo rigoroso dei tempi di esecuzione, ecc. (Dörries and Zahradnik, 2019; Russo Ermolli and Galluccio, 2019; Scalisi and Sposito, 2021).

L'Off-Site Modular Construction permette la realizzazione di edifici a complessità variabile, dove la cellula tipo si configura come un «[...] three-dimensional or volumetric unit that is assembled in a factory and delivered to a construction site as the main structural element of a building» (Lawson, Ogden and Goodier, 2014, p. 1), una modalità costruttiva con radici relativamente lontane nel tempo, segnata da interessanti sperimentazioni con caratteri ricorsivi nei suoi principi fondativi.

Prodromi | Qualsiasi considerazione sul concetto di modulo presuppone, sul piano teorico, il confronto con gli studi e le ricerche di Carlo Giulio Argan (1965) raccolte in *Progetto e Destino*, un testo che ha indagato, in ambito disciplinare, l'evoluzione e il modificarsi rispetto al costruire, l'essere sintesi ed espressione culturale del concetto di modulo. La natura connotativa di queste ricerche ha permesso di definire l'assunto di 'modulo oggetto', quale principio ideativo della costruzione, e di 'modulo-misura', entità dimensionale astratta che, in architettura, può stabilire relazioni qualitative o quantitative tra le parti.

In termini evolutivi il 'modulo-oggetto', compendio dei concetti di 'modulo-compositivo', 'modulo-costruttivo' e 'modulo-tipologico', si è manifestato in molteplici situazioni: nelle strutture reticolari di Fuller, nella modularità addizionale di Utzon, nelle applicazioni sperimentali di tipo industriale di Wachsmann, nel concetto di edificio aperto di Habraken, nelle prototipizzazioni di Kurokawa, nonché nel Sistema Abitativo di Pronto Impiego di Spadolini (Tab. 1). Questo quadro evolutivo comprende anche le sperimentazioni di W. Gropius e J. Prouvé che, oltre a esplorare le potenzialità del

modulo nell'ambito delle emergenze sociali legate all'abitare, hanno saputo ampliare il dibattito scientifico attorno al paradigma di flessibilità funzionale, spaziale e tecnologica.

Secondo Argan, il modulo-oggetto si trasforma in 'principio ideativo', diventando 'il fatto-base della costruzione'; diversamente dal modulo-compositivo, entità dimensionale virtuale utile a stabilire relazioni metriche quantitative o qualitative tra le parti, il modulo-oggetto consente all'architettura di introdurre un cambio di paradigma, facendo coincidere un'entità non fisica con un prodotto industriale finito.

A partire dagli anni '60 questi assunti vengono applicati alla residenzialità universitaria, restituendo sperimentazioni innovative, 'archetipi' paradigmatici, involontari modelli anche per le soluzioni più recenti. Tale processo può essere compreso solamente riferendosi alle trasformazioni culturali e disciplinari introdotte dal razionalismo degli anni '30, durante il quale il tema dell'abitare viene ricondotto a una questione meramente funzionale. A ciò si deve aggiungere la riconsiderazione del ruolo dell'utente come parte attiva nel progetto, che maturerà negli anni a seguire, cambiando il rapporto tra chi progetta e chi produce, immaginando una produzione di massa aperta anche all'architettura. Il progetto non appartiene più a un'élite, ma alla capacità di chi lo usa che, sulla base della sua creatività personale, lo interpreta, modifica e rigenera per dare risposte adeguate ai bisogni dell'uomo contemporaneo.

Ricadute sul progetto dell'housing universitario si hanno anche grazie agli Archigram e al loro manifesto interesse nei confronti delle nuove tecnologie e dell'industrializzazione. Nel 1960 Peter Cook, figura apicale degli Archigram, progetta *Car Body / Pressed Metal Cabin*, una casa pop per studenti, piena di gadget e prodotta in serie con moduli abitativi in plastica e metallo (Fig. 2) che da corpo a una soluzione lontana dalla staticità spaziale e dalla rigidità costruttiva delle soluzioni per l'abitare da studenti, materializzando una visione inusuale con rimandi alla letteratura fantascientifica e alla cibernetica, una sorta di trascrizione letterale degli entusiasmi per il design del settore automobilistico.

Nello stesso periodo Herbert Ohl, docente all'Intstitute of Industrialised Building di Ulm, progetta il sistema *Raumzellenbauweise* (Short, 2021), composto da unità abitative modulari tridimensionali (Fig. 3) in calcestruzzo armato estruso (6,00 x 2,69 x 2,74 m), assemblabili tramite bullonatura agli angoli, in molteplici configurazioni morfologiche e spaziali. Il sistema si basa su un approccio sistemico, con attenzione alla sostenibilità ambientale, all'ottimizzazione dei materiali, alla semplificazione e rapidità costruttiva, al rapporto basso costo / alta qualità, alla reversibilità delle componenti, al loro ciclo di vita, ecc., proponendo paradigmi anticipatori di quelli che, a distanza di alcuni decenni, si trasformeranno nei protocolli per la certificazione ambientale.

Nel 1964 il tecnocratico Cedric Price presenta *Potteries Thinkbelt*, un progetto dalla forte carica innovativa, che diventa insostituibile fonte d'ispirazione per molte delle più recenti soluzioni abitative modulari per studenti (Vráblová, Czafik and Puškár, 2022; Fig. 4). Il Thinkbelt propone un linguaggio che allude esplicitamente all'estetica del mondo industriale e della meccanica (Lobsinger, 2000), pre-

figurando un'Università su rotaie per 20.000 persone da ospitare in capsule aggregabili, flessibili, adattabili, ricollocabili denominate 'sprawl', 'capsule', 'crate' e 'battery housing'. Secondo Price «[...] while students are at present one of the most mobile social groups of technologically advanced societies the nature of their own particular production plants – schools, colleges and universities – is static, introspective, parochial, inflexible and not very useful» (Price, 1970, p. 13).

Nell'evoluzione delle sperimentazioni abitative destinate alla residenzialità universitaria, il modulo-oggetto trova applicazione, sotto forma di elementi tecnici (bagni e cucine), anche nell'ambito del recupero del costruito. Intorno agli anni Settanta, nell'International Students Club, lo Studio londinese Terry Farrell & Nicholas Grimshaw Partnership propone l'utilizzo di componenti modulari preprogettati, preingegnerizzati e prefabbricati nel recupero di una serie di Terrace Houses di epoca vittoriana (Fig. 5). Il progetto prevede di affiancare all'esistente una Server Tower con una rampa a spirale che disimpegna una serie di servizi igienici modulari composti da sei diversi quarti di moduli prefiniti in plastica rinforzata che esemplificano, in modo quasi didascalico, le potenzialità della progettazione modulare applicata all'esistente.

Da questo quadro, seppur sintetico, emerge come lo student housing sia stato storicamente e continui ad essere un campo di sperimentazione non solo tipologica ma anche tecnologica. Oggi, sul piano costruttivo le aggregazioni dei moduli abitativi possono essere molteplici: per affiancamento, sovrapposizione e giustapposizione, con soluzioni bifacciali, parzialmente bifacciali, di supporto angolare, non portanti, a componenti, ecc. (Subramanya, Kermanshachi and Rouhanizadeh, 2020; Fig. 6), con sistema strutturale puntiforme, lineare o scatolare, autoportante o no, realizzato in cemento armato, acciaio o legno (Tab. 2); ogni brevetto ha prestazioni specifiche non generalizzabili, seppure prevalga la struttura autoportante con finiture a secco.

La funzione degli interni dei moduli è solitamente definita dagli spazi destinati alla camera da letto e al bagno. Il bagno, se ventilato naturalmente, si trova in prossimità dell'ingresso e all'unità abitativa si accede solitamente tramite un connettivo lineare (ballatoio), con conseguente contrazione del livello di privacy. Oltre a camera e bagno si possono avere altri spazi come angolo cottura, micro-soggiorno, balcone, ecc.; in questo caso il modulo ha quasi sempre uno sviluppo longitudinale, poiché la posizione del bagno permette di scomporre il layout della pianta in due distinte zone funzionali. A scala di edificio gli spazi derivanti da differenti combinazioni dei moduli danno forma all'organizzazione generale delle funzioni, raggruppabili in quattro macrocategorie: sfera privata (camera e bagno), uso semiprivato giornaliero (cucina e soggiorno), attività ricreative comuni (studio, sport, ecc.) e quelle ausiliarie come lavanderia, spazi tecnici, ecc. (Vráblová, Czafik and Puškár, 2022).

Per soddisfare il requisito dell'accessibilità economica (Kim and Kim, 2016) si ricorre in molti casi alla riduzione della superficie disponibile all'interno dei moduli. La conseguente riduzione della vivibilità degli spazi interni fa sì che questo tipo di soluzione venga prevalentemente scelta per abitazioni destinate a soggiorni brevi (Kotradyova et alii, 2019;

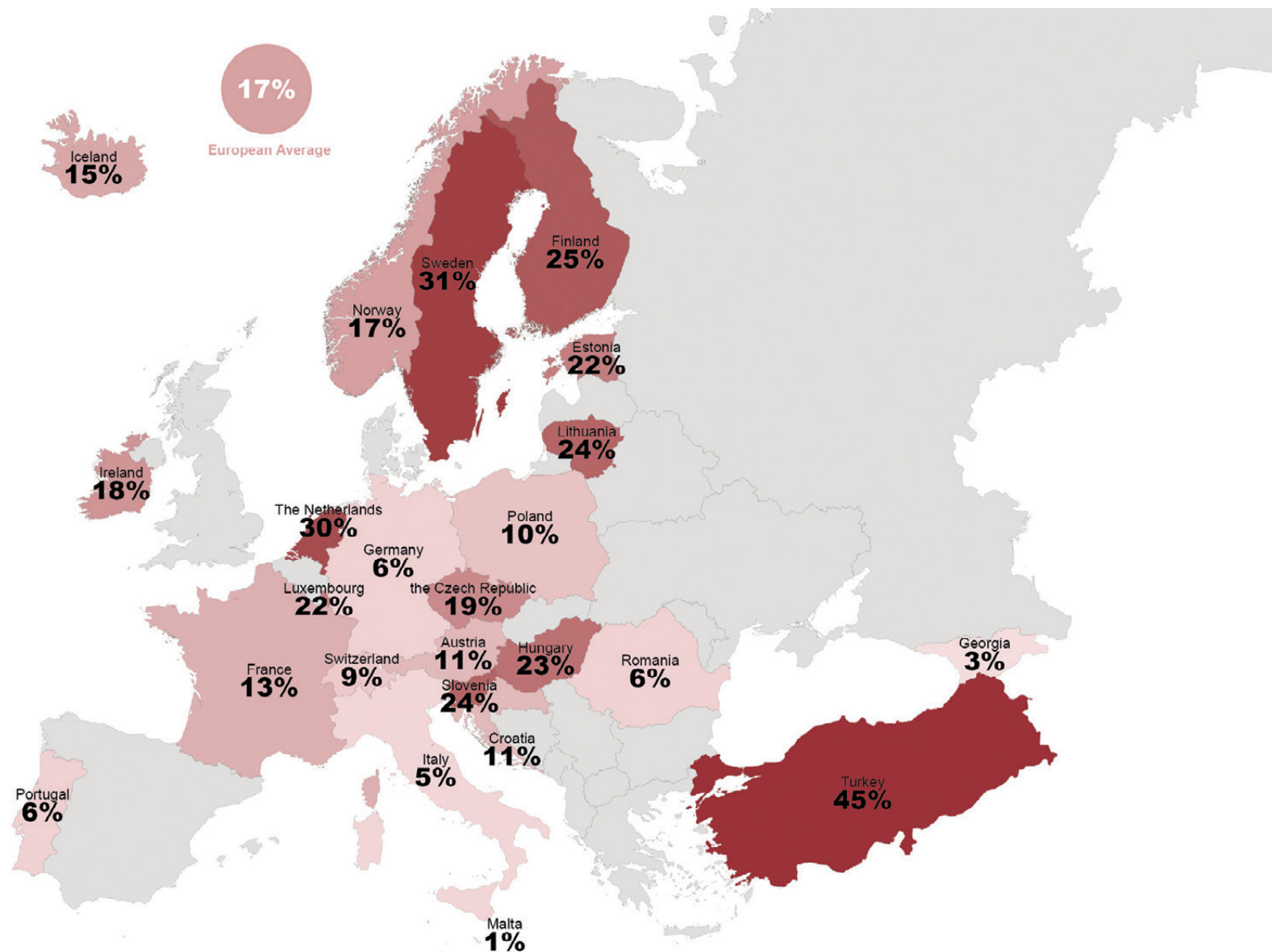


Fig. 1 | Students' housing situation: students living in student accommodations (credit: elaboration by the Authors on Eurostudent VII 2018-2021 data).

Yu et alii, 2019). La superficie dei moduli per l'abitare da studenti generalmente varia tra 17 e 56 mq (media 20/25 mq), la larghezza è solitamente compresa fra i 2,75 e 4,25 m, (media 3,40 m) e la profondità si attesta mediamente sui 6,85 m (Vráblová, Czafík and Puškár, 2022; Fig. 7); le dimensioni dei moduli sono comunque condizionate dalla normativa sui trasporti speciali, che possono variare a seconda della Nazione. La tipologia costruttiva dei moduli per lo student housing può essere ricondotta a tre macrocategorie:

- Fully Modular, in cui tutte le parti vengono assemblate e rifinite in fabbrica, mentre in cantiere si richiedono le connessioni alle fondazioni, al sottosistema portante e agli impianti a rete;
- Sectional, caratterizzata da moduli piccoli e facili da trasportare che possiedono un certo potenziale di implementazione tramite la fabbricazione digitale e l'aggiunta di componenti;
- Component, sistema a pannelli pretagliati e preingegnerizzati facilmente manovrabili e assemblabili; i componenti più piccoli richiedono tempi più lunghi di assemblaggio in loco, ma possiedono una maggiore flessibilità dal punto di vista morfo-tecnico-tipologico.










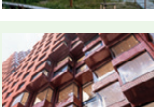
Nell'ambito dei Fully Modular esiste un'ulteriore

taxonomia legata alla messa in opera (Hou, Zhang and Lai, 2023; Fig. 8), per cui si hanno sistemi self-supporting (Tab. 3), core-supporting (Tab. 4) e frame-supporting (Styles et alii, 2016; Tab. 5), con una media di 8/10 piani fuori terra. I moduli abitativi per studenti generalmente soddisfano tutti i requisiti prestazionali di base (Chen et alii, 2021) e, spesso, possiedono prestazioni superiori. A sostegno dell'interesse che questa metodologia costruttiva sta suscitando presso gli operatori del settore, è possibile segnalare come negli ultimi anni la letteratura scientifica si sia fortemente consolidata, approfondendo potenzialità e limiti che i moduli abitativi modulari sono in grado di offrire (Subramanya, Kermanshachi and Rouhanizadeh, 2020; Agha et alii, 2021).

Potenzialità | I benefici più evidenti che i moduli abitativi presentano sono dovuti alla prefabbricazione e alle conseguenti modalità produttive e di messa in opera: rispetto ai sistemi costruttivi tradizionali, questa tecnica risulta più sostenibile, economica e funzionale. Il tempo necessario per completare una residenza di questo tipo è solitamente inferiore del 50-60% rispetto alla costruzione basata su tecniche tradizionali (Ferdous et alii, 2019),

soprattutto perché il processo non è condizionato dalle condizioni metrologiche.

L'automazione e la digitalizzazione permettono inoltre di rispondere ai controlli di qualità di linea garantendo il prodotto finale. La prefabbricazione permette l'informatizzazione in house di tutte le prescrizioni derivanti dalle normative in ambito edilizio, sanitario, ambientale, di sicurezza, ecc. (Chen et alii, 2021). I benefici ecologici dei moduli abitativi per l'abitare da studenti sono soprattutto dovuti alla scarsa produzione di rifiuti di cantiere e all'utilizzo di tecniche costruttive a basso impatto ambientale (Mesa, Esparragoza and Maury, 2020): rispetto alle modalità costruttive tradizionali, i sistemi abitativi prefabbricati riducono la quantità di rifiuti da discarica del 70% (Jaillon, Poon and Chiang, 2011), la rumorosità delle lavorazioni di cantiere del 30-50% (Lawson, Ogden and Bergin, 2012), mentre le vibrazioni e le polveri (Ferdous et alii, 2019) risultano in linea con i principi LCA (Kamali and Hewage, 2016), creando luoghi di lavoro più sicuri e salubri (Enshassi et alii, 2019). Inoltre la ripetitività delle fasi produttive permette un controllo puntuale della quantità dei materiali e il loro riutilizzo all'interno del ciclo produttivo (Illankoon and Lu, 2020).

Year	Imagine	Project	Notes
1967		Moshe Safdie, HABITAT 67, Montréal (CA) ©Gili Merin	Iconic architecture that takes its name from the event for which it was built, Expo 67 'Man and His World'. A housing complex (160 apartments, 12 floors), built with 354 (11,7 x 5,3 x 3 m) prefabricated, prestressed reinforced concrete 'boxes' placed in their place by a crane and held together by cables. It represents the idea of economic construction for collective needs.
1971		Paul Rudolph, ORIENTAL MAXSONIC GARDENS, New Haven (USA) ©Paul Rudolph Collection, Library of Congress	The modularity of the project allows for 148 building units to be built on 4.700 sqm site area. It was the first project utilizing the 'Twentieth Century Brick'. These stacked houses consist of two blocks, one at the ground floor (living-dining-kitchen), a second at the second floor (bedrooms and baths).
1972		Marco Zanuso and Richard Sapper, MOBILE HOUSING UNIT ©Richard Sapper Archives	A flexible and mobile housing system for the exhibition 'Italy: the New Domestic Landscape' held at MoMA. This housing module, although designed as an autonomous unit, had the inherent ability to be extensible and repeatable. Its main aim was to provide a solution for potential emergency situations.
1972		Kisho Kurokawa, NAKAGIN CAPSULE TOWER, Tokyo ©Archspace	Two buildings, 11 and 13 floors, consisting of a series of cubes (capsules) stacked on each other. The 140 prefabricated modules (2.3 x 3.8 x 2.1 m) are independent of each other and are supported by the central reinforced concrete supporting structure
1982		Renzo Piano EVOLUTIVE HOUSING, Corciano (IT) ©Fondazione Renzo Piano	The apartments' architectural concept integrates the concepts of prefabrication and adaptability that Piano had been exploring since the 1960s and the experience of Laboratori di Quartiere. The goal was to create affordable housing modules, flexible and with the possibility of expanding or reducing the habitable surface over time.
1984		Piet Blom, KUBUSWONINGEN, Rotterdam (NL) ©Dirk Verwoerd	The project consists of an inclined wooden cube that stands with a point on a hexagonal concrete core, where there are the entrance and the stairwell. On the lower floor are the kitchen and bathroom, on the middle floor the bedrooms and bathroom, on the top floor either the children's room or a solarium.
1984		Pierluigi Spadolini, SAPI, ©Edil.Pro. Gruppo IRI-Italstat / Archivio Eredi Pierluigi Spadolini	Sistema Abitativo di Pronto Intervento (SAPI) was one of the first Italian prefabrication experiments. Fiberglass housing modules of various sizes for emergency situation. The main objective was to have a minimum volume in the transport phase and a maximum volume in the use phase.
2003		Alejandro Aravena, QUINTA MONROY, Iquique (CL) ©Cristobal Palma / Estudio Palma	The project was supposed to secure the case for 100 families, but a budget of only \$7,500 was planned. In response to this problem, it is planned to give only the first half of the house (about 40 sqm). Tenants were given the possibility of expansion up to about 58 sqm or 76 sqm for duplex.
2008		PLOT = BIG + JDS, MOUNTAIN DWELLINGS, Copenhagen (DK) ©Jacob Boserup	An opportunity to explore a new form of symbiotic urbanism when asked to design apartments next to a parking garage. The parking transforms into a podium for the building's 80 homes that form a stepped landscape, a mountain, of modular homes with gardens.
2013		OMA, Ole Scheeren, THE INTERLACE, Singapore (SG) ©Iwan Baan	Thirty-one apartment buildings, each six stories tall and identical in length, are stacked in a hexagonal arrangement around eight open courtyards. The project, of 170,000 sqm and over 1,000 residential units of various sizes, promote a sense of community, but maintaining individuality.
2022		BIG, SNEGLEHUSENE HOUSING, Aarhus (DK) ©Rasmus Hjørtshøj - COAST	The project consists of two kinds of stacked modules, which are repeated to create the characteristic checkered pattern. The modular concept has made it possible to keep the simplicity in execution. The project includes a variety of residential options with sizes ranging from 50 to 150 sqm.
2022		MVRDV, RED7, Moscow (RS) ©MVRDV Status: design	Modularity offers the flexibility to create different interior shapes and layouts, both compact and spacious apartments. The overlapping of modules returns a sculptural building, allows distinctive entrances and strengthens the view of the city.

Tab. 1 | Evolution of contemporary modular housing solutions (credit: the Authors, 2023).

L'industria per la produzione di moduli abitativi appare altresì più propensa all'innovazione di processo e di prodotto risultando più sensibile ai temi dell'Industria 4.0, prediligendo una produzione automatizzata, interconnessa ed efficiente. Le costruzioni modulari possiedono un elevato grado di flessibilità tecnologica, rispondono a principi di addizione e reversibilità, rendendo possibili ampliamenti o riduzioni (aggiungendo o sottraendo

moduli). Un'altra possibilità tecnologica riguarda l'adattabilità e trasformabilità, in quanto lo stesso layout del modulo può essere nel tempo modificato o adattato. Una grande flessibilità e variabilità dal punto di vista estetico e figurativo è possibile grazie a un'ampia gamma di prodotti, componenti e sistemi di finitura: ciò permette di far apparire il manufatto non come sommatoria di moduli ma simile a una architettura di tipo conven-

zionale (Bellini and Donadoni, 2018). Considerando che il numero di incidenti (cadute dall'alto, schiacciamento, folgorazione elettrica, ecc.) è significativamente elevato nel settore delle costruzioni (il 20% risulta mortale), la progettazione modulare si configura come una soluzione utile ad aumentare i livelli di sicurezza in cantiere (Enshassi et alii, 2019), rispetto a quelli tradizionali, riducendo i rischi dell'80% circa (Klaekgg, 2013).

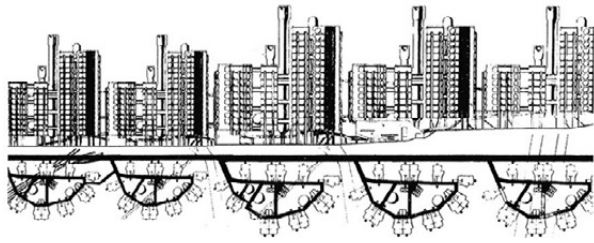
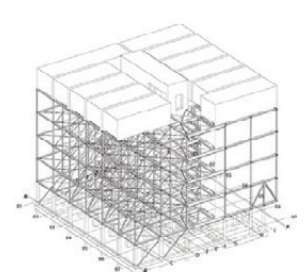
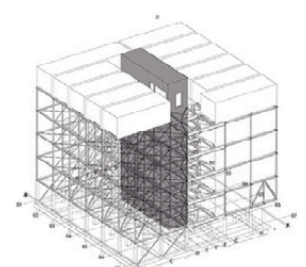
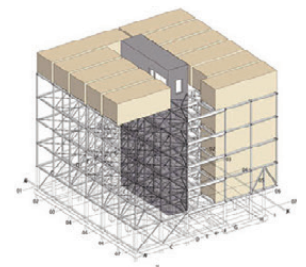
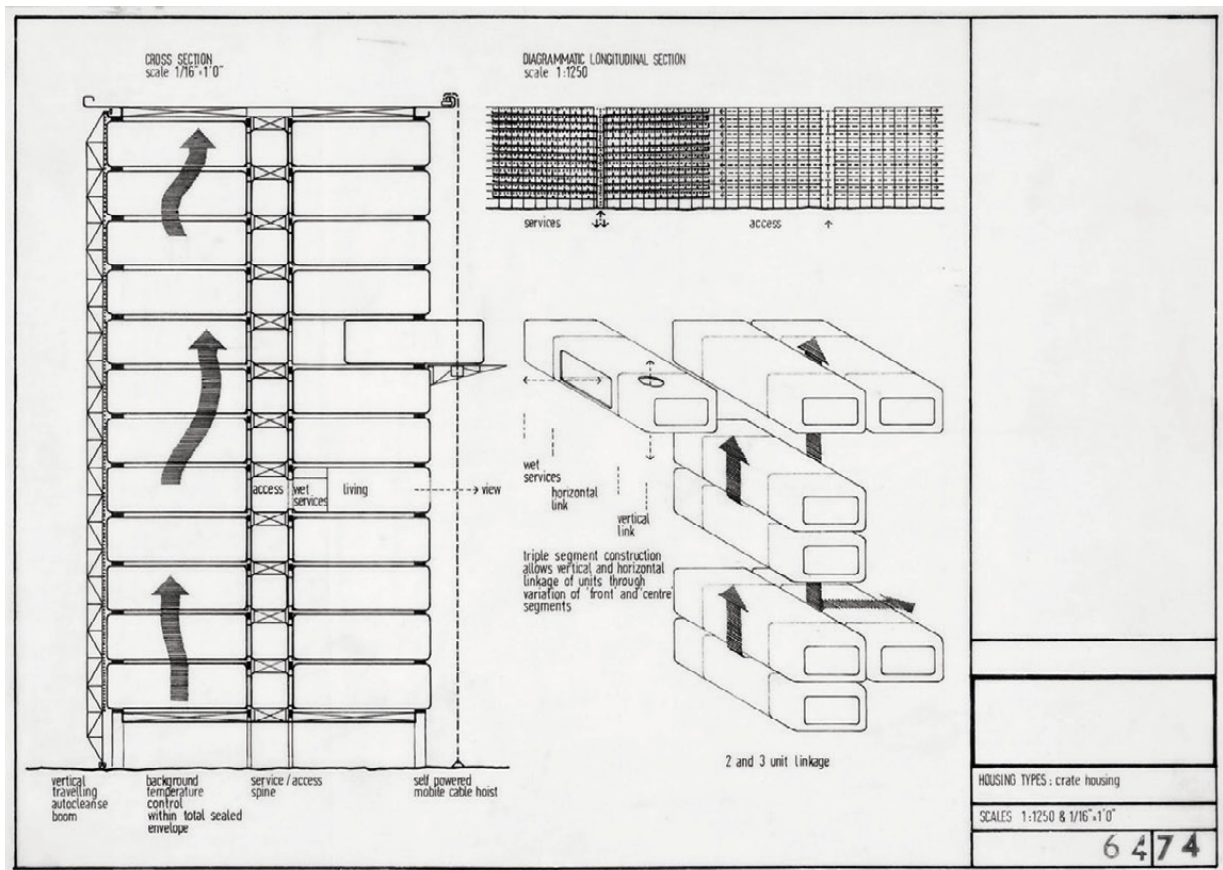
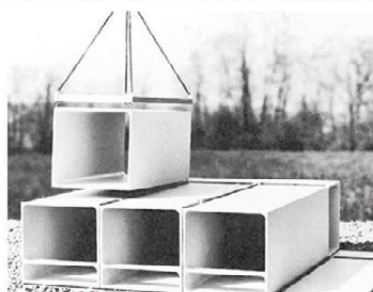
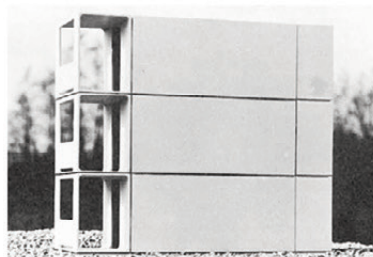
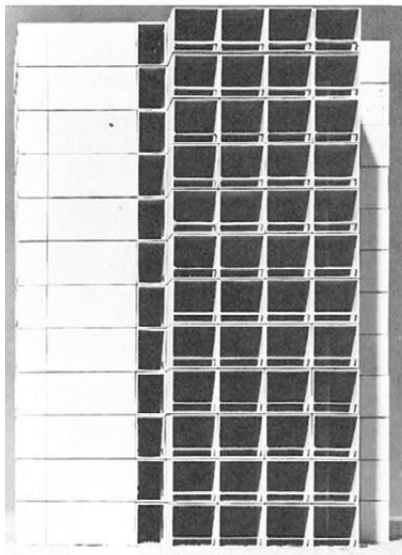
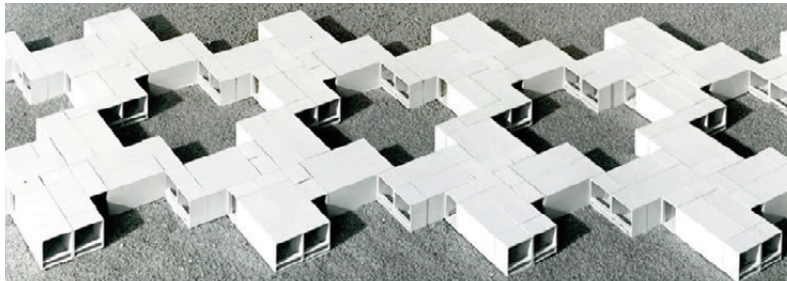


Fig. 2 | Car Body / Pressed Metal Cabin student housing project (1960), designed by Peter Cook: plan and evolution evaluation (credit: Archigram Archives, 1961).

Fig. 3 | Comparison between Raumzellenbauweise (1961), designed by Herbert Ohl and Bernd Meurer, and Student Housing Universitat Politècnica de Catalunya (2012), designed by H Arquitectes + dataAE, Sant Cugat Del Vallès (credits: Roland Fürst, HfG-Archiv / Ulmer Museum; Adrià Goula and H Arquitectes + dataAE).

Fig. 4 | Comparison between Housing types – crate housing (1964), designed by Cetric Price, and Student Housing DUWO in Delft (2009), designed by Mecanoo (credits: Cedric Price fonds, Collection Centre Canadien d'Architecture / Canadian Centre for Architecture, Montréal, 1963; Mecanoo).



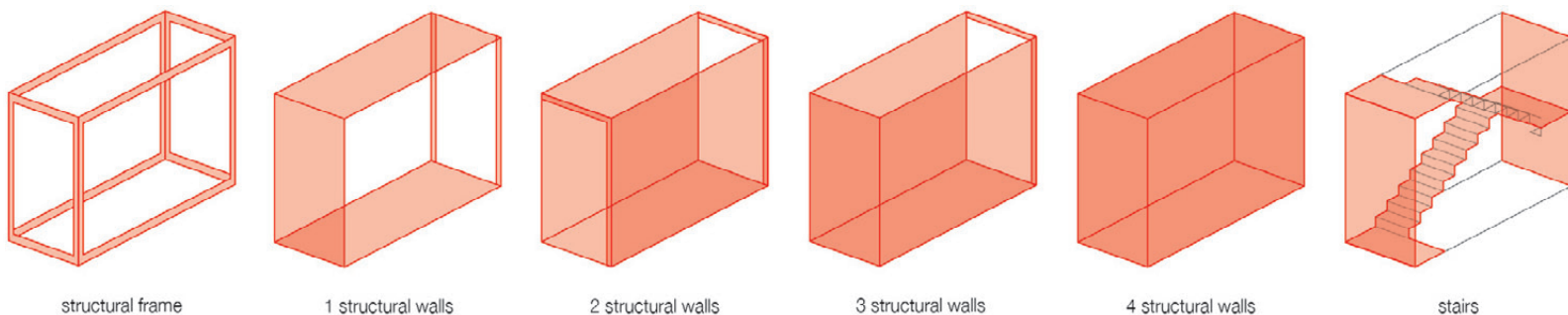
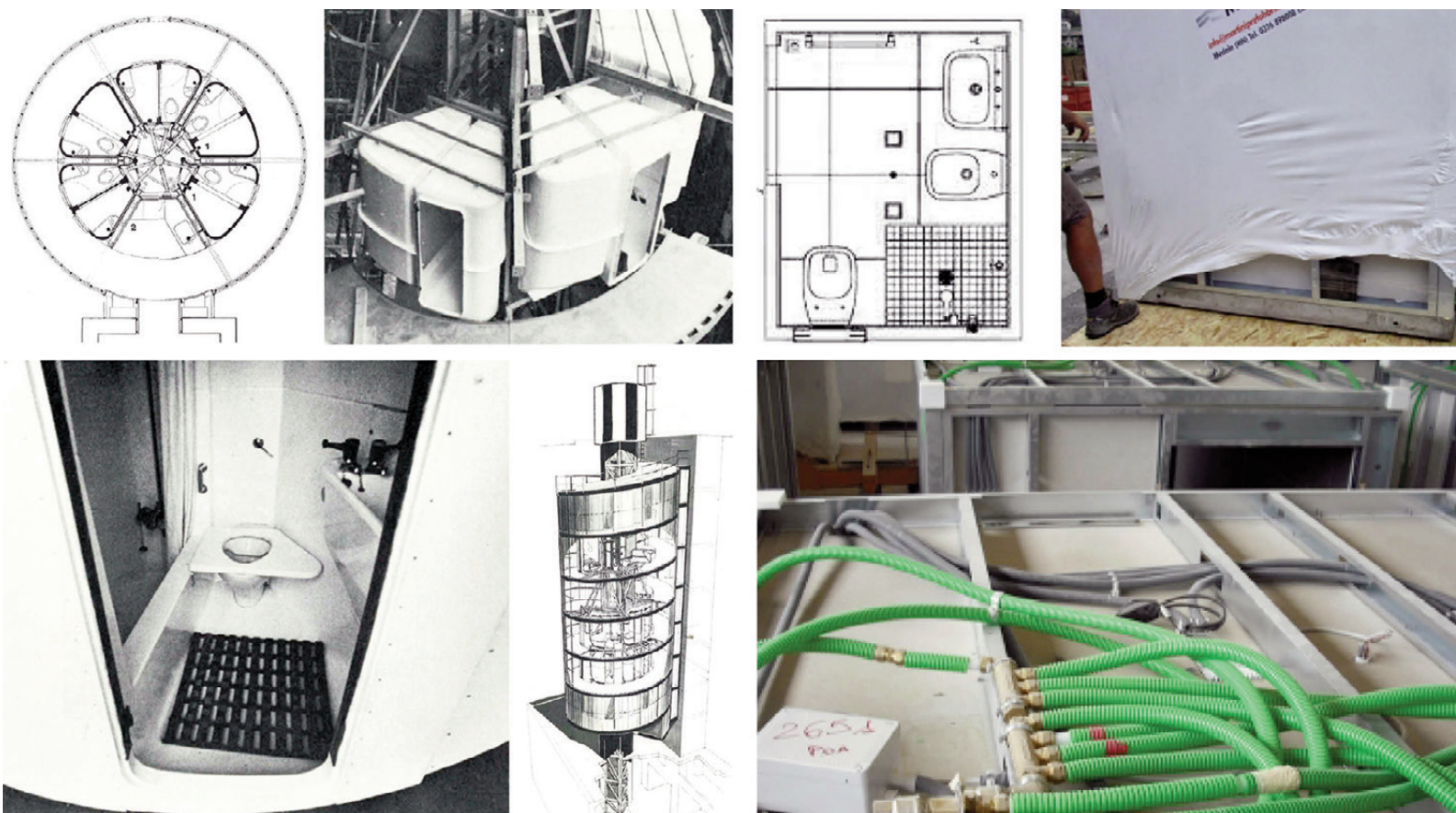


Fig. 5 | Comparison between International Students' Hostel London (1968), designed by Farrell and Grimshaw Partnership, and University Residence Mayer in Trento (2018), designed by Studio BBS (credits: Martini Prefabbricati and P. Simeone).

Fig. 6 | Structural solutions for the volumetric module (credit: the Authors, 2023).

Rispetto ai costi di realizzazione è stato dimostrato come gli edifici con moduli prefabbricati permettano risparmi del 10-25%, soprattutto in relazione all'assenza di imprevisti in corso d'opera (Alazzaz and White, 2014). A questo risparmio contribuiscono diversi fattori di processo: velocità di costruzione; riduzione degli ingombri e dei costi delle attrezzature di cantiere; impiego limitato di macchine edili; ridotto numero di lavoratori con conseguenti risparmi salariali; assenza di fornitura, trasporto e stoccaggio di altri materiali; certezza dei costi; maggiore durata del ciclo di vita; minori costi di manutenzione, ecc. Queste prerogative consentono un ritorno economico dell'investimento iniziale in tempi relativamente più veloci, un risparmio del 20% sui costi e una riduzione dei rischi d'impresa sulla programmazione che può arrivare al 50% (Salama et alii, 2017).

Limiti | Sebbene i costi di produzione dei moduli prefabbricati per la realizzazione di residenze universitarie siano inferiori, rispetto al costruito tradi-

zionale, è sempre necessario poter disporre di un impianto di produzione organizzato su principi di ripetibilità, automazione e digitalizzazione. L'impianto deve essere pianificato sulla base di un business plan che, oltre a verificare i tempi di ritorno del consistente investimento iniziale, deve accertare l'esistenza di domanda concentrata, la disponibilità di manodopera specializzata e la possibilità d'accesso veloce ai collegamenti viari (Rahman, 2014). Fra i limiti di questo sistema costruttivo vi è la necessità di avvalersi di professionalità altamente specializzate, sia per la progettazione che per la realizzazione dei moduli.

A causa della differenza di approccio fra progettazione modulare e convenzionale possono sorgere criticità di coordinamento del processo di progettazione, produzione e assemblaggio. Un'accurata pianificazione del progetto è un requisito necessario per controllarne il risultato finale; pertanto la presenza di esperti con comprovate capacità nell'ambito della progettazione modulare è fondamentale, parimenti a quella di esperti dell'abitare

da studente (Li, Shen and Xue, 2014). L'architettura modulare prefabbricata non sempre permette la realizzazione di ampi spazi comuni dedicati agli studenti a causa della sua rigidità spaziale e tipologica.

Dal punto di vista culturale gli operatori del settore edilizio spesso non riconoscono i sistemi modulari come una vera e propria tecnica costruttiva (nonostante questi sistemi riescano a soddisfare a pieno i requisiti e gli standard richiesti) e tra gli studenti persiste una certa diffidenza nei confronti di questi sistemi per la scarsa definizione estetico-figurativa (dovuta all'immagine di tecnicità, uniformità e monotonia) delle soluzioni impiegate (Vráblová, Czafík and Puškár, 2022). Si rende pertanto necessario sensibilizzare il mondo professionale, gli studenti / utenti e le Università sulle possibilità che questo sistema costruttivo può offrire.

La morfologia e la geometria dei moduli sono vincolate dalle dimensioni dei mezzi di trasporto, pertanto se il trasporto si configura come ecce-

Terms	Definition	Example
OFF-SITE PRODUCTION	Largely interchangeable terms referring to the part of the construction process that is carried out away from the building site. This can be in a factory or sometimes in specially created temporary production facilities close to the construction site (or field factories). ©Horizon North	
PREFABRICATION (Prefabricated Building)	This is a general term for the manufacture of entire buildings or parts of buildings offsite prior to their assembly onsite. Prefabricated buildings include both portable buildings and the various types of permanent building systems. Offsite is now the more commonly used term. ©Summary	
PREASSEMBLY	The manufacture and assembly of a complex unit comprising several components prior to the unit's installation onsite. Offsite is now the more commonly used term. ©QWEB	
STANDARDISATION	The extensive use of components, methods or processes in which there is regularity, repetition and a background of successful practice. This may include standard building products, forms of contract, details, design or specifications and standard processes, procedures or techniques. ©L&G	
HYBRID BUILDING SYSTEM	A combination of volumetric and panelised systems where the high value areas (kitchen and bathroom) are typically formed from volumetric units (sometimes referred to as pods) and the rest of the structure formed from some form of framing system. ©Sterchelegroup	
MODULE (Modular Construction, Modular System, Modularisation)	More commonly, they refer to volumetric building modules where the units form the structure of the building as well as enclosing useable space. The terms are also sometimes used to describe room modules, which do not incorporate their own superstructure. ©Plant PreFrab	
POD	Prefabricated volumetric pod, fully factory finished internally complete with building services, probably not completed externally. Types of pod include bathrooms, shower rooms, office washrooms, plant rooms, kitchens. ©Surepods	
ELEMENT	Part of a building or structure that could be considered for standardisation and offsite production such as foundations, structural frame, envelope, services, internals and modular units. ©Ckark Pacific	

Tab. 2 | Some definitions of off-site construction (source: Gibb and Pendlebury, 2013).

zionale sono obbligatori permessi speciali e veicoli di accompagnamento, con un conseguente notevole aumento dei costi¹. La costruzione modulare richiede anche un'accurata pianificazione degli aspetti logistici, come lo studio dei percorsi, verificandone ad esempio le restrizioni di percorribilità, i sottopassi, le gallerie e le curve. Una volta giunti in cantiere i moduli vengono assemblati mediante un meccanismo di sollevamento, il più delle volte una gru mobile, attività questa molto delicata che richiede particolare attenzione anche alla sicurezza degli operatori (Fig. 9).

L'architettura modulare per studenti, spesso, si scontra con apparati normativi cogenti e con regolamenti edilizi e urbanistici locali che non contemplano questo tipo di architetture per soluzioni abitative a medio-lungo termine.

Prospettive | I moduli abitativi prefabbricati per l'ospitalità universitaria presentano generalmente più vantaggi che svantaggi (Wallace, 2021). I limiti di questo sistema possono presumibilmente essere eliminati sulla base di ulteriori ricerche e analisi, soprattutto in ambiti specifici come quello del-

l'abitare da studenti. Tuttavia non è possibile stabilire a priori se l'uso della costruzione modulare risulti più appropriato rispetto alle tecniche costruttive convenzionali. Ogni intervento deve essere considerato a sé e valutato all'interno del contesto di riferimento; parimenti ogni scelta deve essere guidata sia da un appropriato processo decisionale che sappia valutare capacità progettuali, know-how tecnologico e capacità tecniche sia da una oculata valutazione di limiti e opportunità che l'impiego di una tecnica comporta. Nonostante ciò è possibile riconoscere la grande po-

tenzialità dei sistemi abitativi modulari prefabbricati, soprattutto se relazionati a specifiche emergenze abitative, come quella delle residenze universitarie nel nostro Paese.

La stringente attualità del tema e le prerogative della progettazione modulare concorrono a ipotizzare che la necessità di implementare in breve tempo il numero dei posti letto – secondo criteri di affidabilità ed efficienza, razionalizzazione dell'iter realizzativo, controllo dei costi e dei tempi di costruzione, riduzione degli scarti di lavorazione e raggiungimento di adeguati parametri di efficienza energetica e decarbonizzazione – contribuisce all'opportunità di considerare questa opzione.

Nell'ambito poi della gestione e implementazione della progettazione il BIM, ormai obbligatorio per gli appalti dei lavori pubblici, consente di avvalersi di una matrice ragionata e relazionale di attività e compiti guida che possono definire anche nella progettazione modulare l'analisi pratica dei limiti e delle opportunità (Qin and Yao, 2020;), grazie a un software che, senza limitare la capacità creativa dell'architetto, può aumentare l'efficienza della progettazione e un corretto impiego delle risorse.

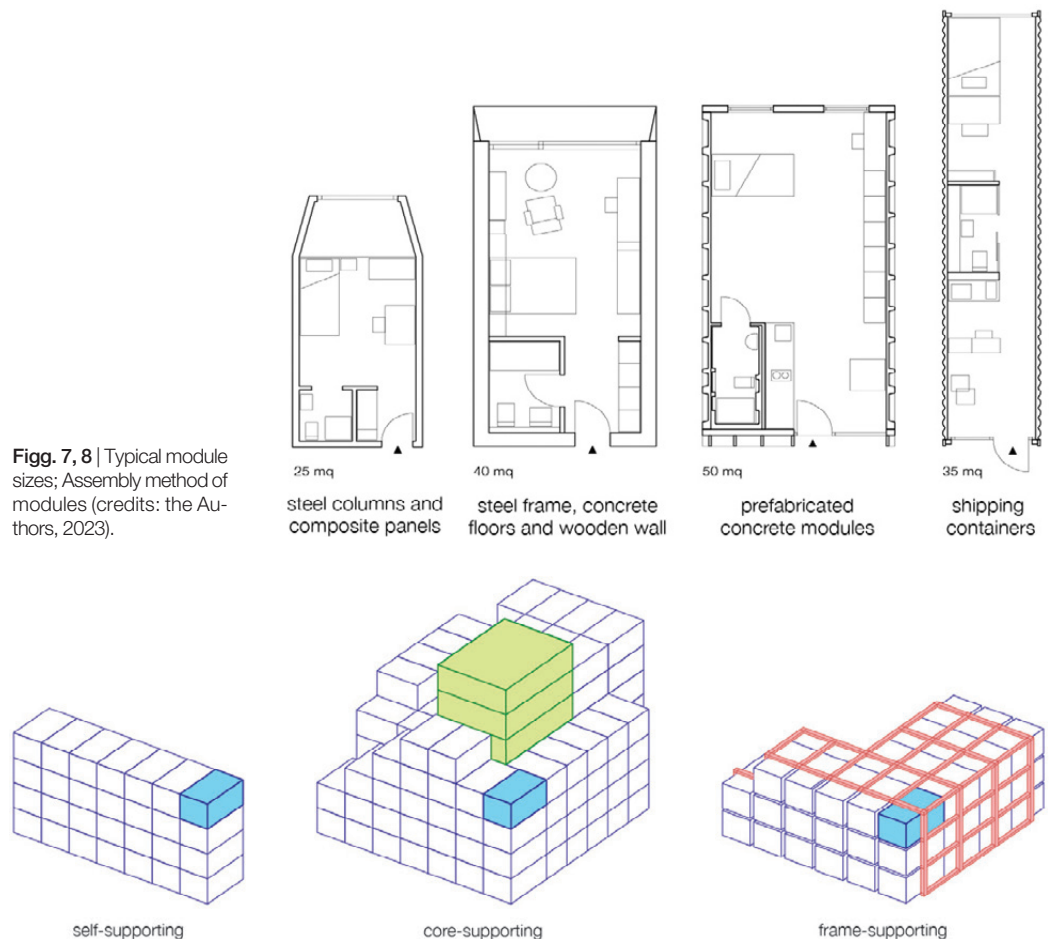
L'architettura modulare prefabbricata può essere quindi proposta come un modo innovativo per controllare l'ideazione, la costruzione e la gestione delle residenze universitarie, senza però dimenticare che i valori culturali e simbolici che questa architettura universitaria rappresenta, devono essere sostenuti dal «[...] mettere in conto che i problemi dell'istruzione non possano compiersi senza un'architettura educatrice» (Rogers, 1947, p. 1).

In a university education system that aims to be competitive internationally, student residences represent an unavoidable social infrastructure to support mobility. In addition to facilitating the reduction of education costs, in which the 'accommodation' has a significant impact (Hauschildt et alii, 2021), these infrastructures appear, from a sociological point of view, to be the most appropriate solutions to promote individual independence, experience the community dimension, encourage, and foster the relationships between heterogeneous groups of people (with different origins and cultures). Nevertheless, the shortage of student accommodation remains a limit that thousands of off-campus university students are dealing with. In Italy, only 5% of students live in this typology of housing (Fig. 1; Hauschildt et alii, 2021).

To address this housing issue, it is possible to use modular off-site housing systems, an efficient and versatile construction solution widely used in emergency housing and recently in the student housing sector. In these cases, the design module is transformed to create expressiveness. The former could be capable of governing various aspects of process and product, using the principles of industrialisation and prefabrication, such as construction simplicity and speed, performance levels quality, compliance with environmental and anti-seismic regulations, strict control of execution times, etc. (Dóries and Zahradnik, 2019; Ermolli and Galluccio, 2019; Scalisi and Sposito, 2021).

Off-site Modular Construction enables the design of buildings with different scales of complexity, where the standard cell is configured as a «[...]

Figg. 7, 8 | Typical module sizes; Assembly method of modules (credits: the Authors, 2023).



three-dimensional or volumetric unit that is assembled in a factory and delivered to a construction site as the main structural element of a building» (Lawson, Ogden and Goodier, 2014, p. 1). This construction technique has relatively distant roots in time, marked by interesting experiments that, in many situations, seem to possess recursive characteristics.

Prodromes | On a theoretical level, any consideration of the concept of module presupposes a comparison with the studies and research of Carlo Giulio Argan (1965), collected in *Progetto e Destino*. This book investigated the module's evolution, adjustments, synthesis, and cultural expression in the disciplinary context. The connotative nature of this research has allowed to define the assumption of 'module-object' as the conceptual principle of construction and of 'module-measure', an abstract dimensional entity that, in architecture, establishes qualitative or quantitative relationships between the parts.

In evolutionary terms, the 'module-object', a compendium of the concepts of 'compositional module', 'constructive module' and 'typological module', manifests itself throughout the history of architecture in multiple situations: in Fuller's reticular structures, in Utzon's additional modularity, in Wachsmann's experimental industrial applications, in Habraken's concept of Open Building, in Kurokawa's prototypes, as well as in Spadolini's Sistema Abitativo di Pronto Impiego (lit. Emergency Housing System; Tab. 1). In addition to exploring the potential of the module in the context of social emergencies related to housing, this evolutionary framework also includes the experimental ex-









periences of W. Gropius and J. Prouvé, who expanded the scientific debate around the paradigm of functional, spatial, and technological flexibility.

In all these cases, according to Argan, the 'module-object' is transformed into an 'ideational principle', becoming 'the basic fact of construction'. Unlike the compositional module (a virtual dimensional entity useful in establishing quantitative or qualitative metric relationships between parts), the object-module allows architecture to introduce a paradigm shift, making a non-physical entity merge with an industrial product.

Since the 1960s, these assumptions have been applied to university residences, yielding experiments with innovative solutions, paradigmatic 'archetypes' and involuntary models even for the most recent solutions.

This process can only be understood by referring to the cultural and disciplinary transformations proposed by Rationalism (1930s) for the first time when the topic of housing was reduced to a purely functional issue. Additionally, reconsidering the user's role as an active part in the project changed the relationship between those who design and those who produce, imagining a mass production also open to architecture. In this way, the project no longer belongs to an elite but to the capacity of those who use it. To respond to their needs, the users can interpret, modify, and regenerate the project based on their creativity.

The repercussions on the university housing project of this new conceptual framework are also due to the Archigram and their manifest interest in new technologies and increasing industrialisation. In 1960, Peter Cook, a leading figure of Archigram, designed the Car Body / Pressed Metal

SELF-SUPPORTING							
Year	Imagine	Project	Main Material of Structural Support	Size	Main Layout	Storey above ground	Compositional Scheme
2019		WilkinsonEyre, DYSON INSTITUTE, Malmesbury (UK) ©Peter Landers	Cross-Laminate Timber (CLT) construction	30 sqm		3	no-visible
2017		Sauerbruch Hutton, 'WOODIE' STUDENT DORMITORY, Hamburg (DE) ©Jan Bitter	wooden prefabricated modules	19 sqm		7	semi-visible
2011		Harquitectes + Data AE, STUDENT HOUSING, Sant Cugat del Vallès (ES) ©Adrià Goula	prefabricated concrete modules	55 sqm		2	semi-visible
2010		Fact Architects, ZUIDERZEEWEG, Amsterdam (NL) ©Fact Architects	steel frame, wood-based panels	30 sqm		5	semi-visible

Tab. 3 | Structural solutions for Student Housing modular buildings: self-supporting (credit: the Authors, 2023).

Cabin, a mass-produced pop house for students realised with plastic and metal modules (Fig. 2). This solution overcame the spatial and construction rigidity of typical student housing solution for the time. It represented an unusual vision with references to science fiction literature and cybernetics, a literal transcription of the enthusiasm for the automotive sector.

In the same period, Herbert Ohl, a professor at the Institute of Industrialised Building in Ulm, designed the Raumzellenbauweise system (Short, 2021), composed of three-dimensional modular housing units (Fig. 3) in extruded reinforced concrete (6.00 x 2.69 x 2.74 m). Assembled by bolting at the corners, this system allowed multiple morphological and spatial configurations. It was based on a systemic approach, with attention to environmental sustainability, optimisation of materials, simplification and speed of construction, low-cost / high-quality, reversibility of components, their life cycle, etc. These paradigms anticipated, after a few decades, protocols for environmental certification.

In 1964, the technocratic Cedric Price presented Potteries Thinkbelt, a project with a robust innovative charge that became an irreplaceable source of inspiration for many of the most recent modular housing solutions for students (Vráblová, Czafík and Puškár, 2022; Fig. 4). The Thinkbelt proposes a language that explicitly alludes to the aesthetics of the industrial and mechanical world (Lobsinger, 2000), proposing a university on rails, where 20,000 people could live in combinable, relocatable flexible, adaptable, relocatable, differentiated capsule ('sprawl', 'capsule', 'crate' and 'battery housing'). Price writes, «[...] while students are at present




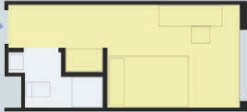




one of the most mobile social groups of technologically advanced societies, the nature of their own particular production plants – schools, colleges and universities, is static, introspective, parochial, inflexible and not very useful» (Price, 1970, p. 13).

In experimental student housing evolution, the 'module-object' finds application in the form of technical elements, bathrooms, kitchens, etc., also in the context of recovering the built environment. Around the 1970s, the architects Terry Farrell & Nicholas Grimshaw Partnership proposed for the International Students Club the use of pre-designed, pre-engineered, and prefabricated modular components in the recovery of a series of Victorian-era Terrace Houses (Fig. 5). The project was meant to add a Server Tower to existing structure with a spiral ramp that served a series of modular toilets services composed of six different quarters of pre-finished reinforced plastic modules. This system exemplified, in an almost didactic way, the potential of modular design applied to the existing building.






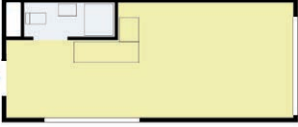

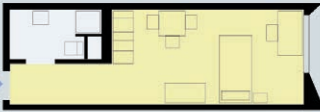
From this albeit synthetic overview, student housing has historically been and continues to be, a field of experimentation not only typological but also technological. On the construction level, the aggregations of the housing modules can be various: by putting next to each other, overlapping and juxtaposition, with component solutions such as bifacial, partially bifacial, angular support, non-load-bearing, etc. (Subramanya, Kermanshachi and Rouhanizadeh, 2020; Fig. 6). Moreover, the structural system could be punctiform, linear or box-shaped, self-supporting or not, and made of reinforced concrete, steel or wood (Tab. 2). Each patent has specific performance that cannot be generalised, although the self-supporting struc-

ture with dry finishes prevails. The bedroom and bathroom usually define the functional nature of the interior of the modules. The former, if naturally ventilated, is located near the entrance, and the housing unit is usually accessed through a linear connectivity (landing), with a consequent contraction of privacy level. In addition to the bedroom and bathroom, there are other spaces, such as a kitchenette, a micro-living room, a balcony, etc.; in this case, the module, in general, has a longitudinal development, where the position of the bathroom allows for the division of the layout into two distinct functional zones. At the building scale, the spaces result from the different combinations of modules that shape the general organisation of functions. These functions can be classified into four macro-categories: private sphere (bedroom and bathroom), semi-private daily use (kitchen and living room), everyday recreational activities (study, sports, etc.) and auxiliary activities such as laundry, technical spaces, etc. (Vráblová, Czafík and Puškár, 2022).

To meet the requirement of affordability (Kim and Kim, 2016), in many cases, the available surface area within the modules is reduced, so this type of accommodation is usually chosen for short-stays (Kotradyova et alii, 2019; Yu et alii, 2019). The surface area of the modules for student residences generally swings between 17 and 56 square meters (average 20/25 square meters), the width between 2.75 and 4.25 m (average 3.40 m) and the depth is on average 6.85 m (Vráblová, Czafík and Puškár, 2022; Fig. 7). The size, on the other hand, is conditioned by the regulations related to special transports, which may change depending on country police.

CORE-SUPPORTING							
Year	Imagine	Project	Main Material of Structural Support	Size	Main Layout	Storey above ground	Compositional Scheme
2021		Jtp Architects, LEWISHAM EXCHANGE, London (UK) ©Benedict Luxmoore & JTP *student and residential	reinforced concrete	20 sqm		20/35	semi-visible
2019		HTA Design, FELDA HOUSE, Wembley London (UK) ©Vision Modular Systems	reinforced concrete	20 sqm		19	no-visible
2017		HTA Design, APEX HOUSE, Wembley (UK) ©Vision Modular Systems	reinforced concrete	25 sqm		29	semi-visible
2011		O'Connell East Architects, VICTORIA HALL STUDENT ACCOMMODATION, Wembley (UK) ©Flatshare Ltd.	reinforced concrete	15 sqm		19	no-visible

Tab. 4 | Structural solutions for Student Housing modular buildings: core-supporting (credit: the Authors, 2023).

FRAME-SUPPORTING							
Year	Imagine	Project	Main Material of Structural Support	Size	Main Layout	Storey above ground	Compositional Scheme
2017		Holzer Kobler Architekturen, FRANKIE & JOHNNY STUDENT HOUSING, Berlin (DE) ©Jan Bitter	shipping containers	26 sqm		4	visible
2010		Atelier Cattani, CITÉ A DOCKS, Le Havre (FR) ©Vincent Fillon	shipping containers	24 sqm		4	visible
2009		Mecanoo Architecten, STUDENT HOUSING DUWO, Delft (NL) ©Christian Richters	steel frame	21 sqm		6	no-visible
2005		Hdvn Architecten, QUBIC, Amsterdam (NL) ©Qubic luuk kramer	flat structural planes	24 sqm		2	semi-visible

Tab. 5 | Structural solutions for Student Housing modular buildings: frame-supporting (credit: the Authors, 2023).

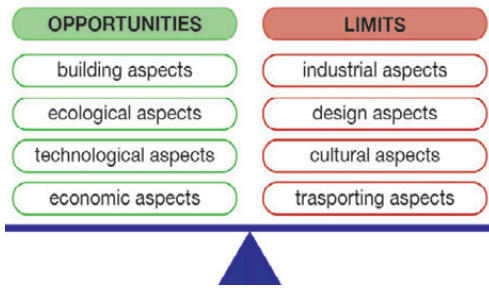


Fig. 9 | Qualitative evaluation of modular housing systems for Student Housing (credit: the Authors, 2023).

The construction typology of the student residence modules can be classified into three macro-categories:

- Fully Modular, in which all the parts are assembled and finished in the factory, while the connections to the foundations, the load-bearing subsystem and the network systems are required on site;
- Sectional, characterised by small, easy-to-transport modules that have some implementation potential through digital fabrication and component addition;
- Component, a system of pre-cut and pre-engineered panels that are easy to manoeuvre and assemble; smaller components require longer assembly times on-site, but have greater flexibility from a morpho-techno-typological standpoint.

Within the Fully Modular typology, there is a further taxonomy related to implementation (Hou, Zhang and Lai, 2023; Fig. 8), for which there are self-supporting (Tab. 3), core-supporting (Tab. 4), frame-supporting systems (Styles et alii, 2016; Tab. 5), with an average of 8/10 floors.

The modules for student residences generally meet all the basic performance requirements (Chen et alii, 2021), even higher than those of traditional buildings. In support of the interest that this construction solution is arousing among operators in the sector, in recent years, the scientific literature has been firmly consolidated, deepening the potential and limits that modular housing solutions can offer (Subramanya, Kermanshachi and Rouhanizadeh, 2020; Agha et alii, 2021).

The Potentiality | The most evident benefits that housing module units present are due to prefabrication and the consequent production and installation methods. This technique is more sustainable, economical, and functional than traditional construction systems. The time required to complete a university residence using modules is usually 50-60% shorter than the conventional construction techniques (Ferdous et alii, 2019), mainly because metrological conditions do not condition the process.

Nowadays, automation and digitalisation also make it possible to respond to line quality controls while guaranteeing the final product. Moreover, prefabrication allows for the punctual computerised in-house control of all requirements deriving from the mandatory regulations in the construction, health, safety, environmental fields, etc. (Chen et alii, 2021). The ecological benefits of housing modules for student residences are mainly due to the low production of waste and the use of construction techniques with low environmental impact (Mesa, Esparragoza and Maury, 2020).

Compared to traditional construction methods, off-site housing systems reduce the amount of landfills waste by 70% (Jaillon, Poon and Chiang, 2011) and minimise construction noise by 30-50% (Lawson, Ogden and Bergin, 2012), vibrations and dust (Ferdous et alii, 2019); additionally, they are in line with LCA principles (Kamali and Hewage, 2016) and create safer and healthier workplaces (Enshassi et alii, 2019). Furthermore, the repetitiveness of the production phases allows for precise control of the quantity of materials and their reuse within the production cycle (Illankoon and Lu, 2020).

The industry of housing modules is also more inclined towards process and product innovation, being more sensitive to Industry 4.0 issues, favouring automated, interconnected, and efficient production. Modular constructions have a high degree of technological flexibility and respond to the principles of addition and reversibility, making expansions or reductions possible by adding or subtracting modules. Another technological possibility concerns adaptability and transformability, as the same module layout can be modified or adapted. From an aesthetic and figurative standpoint, excellent flexibility and variability are possible thanks to a wide range of products, components, and finishing systems. These factors allow the building to appear more similar to conventional architecture and to not an aggregation of modules (Bellini and Donadoni, 2018). Considering that the number of accidents (falls from heights, crushing, electric electrocution, etc.) is significantly high in the construction sector (20% is fatal), modular design is a valuable solution to increase safety levels on site (Enshassi et alii, 2019), by reducing risks by about 80% (Klakegg, 2013).

Regarding construction costs, it has been demonstrated that buildings with prefabricated modules allow savings of 10-25%, especially concerning the absence of unforeseen events during the construction process (Alazzaz and White, 2014). This aspect could be a crucial aspect in the design of university residences. Several process factors contribute to these savings: construction speed, reduction of the overall dimensions and costs of construction equipment, limited use of construction machinery, reduced number of workers with consequent wage savings, supply absence, transport and storage of other materials, price certainty, longer life cycle, lower maintenance costs, etc. These prerogatives allow for a faster economic return on the initial investment, a 20% cost saving, and a reduction in business risks in programming that can reach 50% (Salama et alii, 2017).

Limits | Although the production costs of prefabricated modules for the construction of university residences are lower compared to traditional buildings upstream, it is always necessary to have a production plant organised based on the principles of repeatability, automation, and digitalisation. The process must be scheduled following a business plan: verify the payback periods of the substantial initial investment, the existence of concentrated demand, the availability of specialised labour, and the possibility of fast access to road connections (Rahman, 2014). Among the limitations of this construction system, highly technical professionals are necessary for the design and construction of the modules.

Due to the difference in the approach between modular and conventional design, critical issues can arise in coordinating the design, production, and assembly process. Accurate project planning is an essential requirement to control the final result. The experts with proven skills in the field of modular design are crucial, as well as those specialising in student housing (Li, Shen and Xue, 2014). Prefabricated modular architecture only sometimes allows adequate attention to be given to common areas dedicated to students due to the typological rigidity of this construction system.

From a cultural point of view, operators often do not recognise modular systems as an actual construction technique. Despite these systems can fully meet the needed requirements and standards, among students, there is still a certain distrust of these systems due to the lack of aesthetic-figurative definition, due to the image of technicality, uniformity and monotony (Vráblová, Czafik and Puškár, 2022). Therefore, it is necessary to raise awareness among the professional world, students / users and universities about this construction system's possibilities.

Once prefabricated, the modules must reach the construction site. Therefore, their dimensions are constrained by the maximum capacity of the means of transport, often involving exceptional transport, for which special permits and accompanying vehicles are mandatory, with a consequent significant increase in costs¹. Modular construction requires careful planning of logistical aspects, such as studying routes (verifying practicality restrictions, underpasses, tunnels, and curves). This phase requires particular attention from the operators' safety point of view (Fig. 9).

Modular architecture for students often clashes with mandatory regulatory apparatuses, local building codes, and urban planning regulations that consider something other than this type of architecture for medium-long-term housing solutions.

Perspective | Prefabricated housing modules for university hospitality generally present more advantages than disadvantages (Wallace, 2021). The limitations of this system can be eliminated by further research and analysis, especially in specific areas such as student housing. However, it is impossible to determine in advance whether modular construction is more appropriate than conventional construction techniques. Each intervention must be considered and evaluated within the reference context. Likewise, every choice must be guided by a proper decision-making process that can evaluate design skills, technological know-how, technical skills, and the limits and opportunities a technique entails. Despite this, it is possible to recognise the great potential of prefabricated modular housing systems in our country, especially if related to specific housing emergencies, such as university residences.

The relevance of the topic and the prerogatives of modular design contribute to the hypothesis to rapidly increase the number of beds, according to criteria of reliability and efficiency, rationalisation of the construction process, control of costs and construction times, reduction of processing waste and achievement of adequate energy efficiency and decarbonisation parameters contribute to the opportunity to consider this option. In the context of design management and

implementation, BIM, a mandatory tool in public work that, without limiting the architect's creative capacity, can increase design efficiency and the correct use of resources, allows the use of a reasoned and relational matrix of guiding activities

and tasks, which can also define the practical analysis of limits and opportunities in modular design (Qin and Yao, 2020). Therefore, prefabricated modular architecture can be proposed as an innovative way to control university residences'

design, construction and management without forgetting the cultural and symbolic values represented by this architecture and that education problems can only be solved with educational architecture (Rogers, 1947).

Notes

1) In the Italian Highway Code (Codice della Strada, art. 61), exceptional transport is considered when the vehicle's width, including its load, exceeds 2.55 m., the height 4 m. and the length 12 m.

References

- Agha, A., Shibani, A., Hassan, D. and Zalans, B. (2021), "Modular Construction in the United Kingdom Housing Sector – Barriers and Implications", in *Journal of Architectural Engineering Technology*, vol. 10, issue 2, article 236, pp. 1-7. [Online] Available at: omicsonline.org/open-access/modular-construction-in-the-united-kingdom-housing-sector-barriers-and-implications-114995.html [Accessed 9 October 2023].
- Alazzaz, F. and Whyte, A. (2014), "Uptake of off-site construction – Benefit and future application", in *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 8, issue 12, pp. 1219-1223. [Online] Available at: citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=ae775f1a572d22cf9f9bebbb753ef63be9bd990 [Accessed 9 October 2023].
- Argan, G. C. (1965), *Progetto e Destino*, Il Saggiatore, Milano.
- Ayres, P. (2012), *Persistent modelling – Extending the role of architectural representation*, Routledge, London.
- Bellini, O. E. and Donadoni, F. (2018), "Abitare la temporaneità nello student housing – Una sfida di processo e di prodotto | Living temporarily in the student housing – A process and product challenge", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 4, pp. 129-136. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/4162018 [Accessed 9 October 2023].
- Chen, Z., Wang, J., Liu, J. and Khan, K. (2021), "Seismic behavior and moment transfer capacity of an innovative self-locking inter-module connection for modular steel building", in *Engineering Structures*, vol. 245, article 112978, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112978 [Accessed 9 October 2023].
- Dörries, C. and Zahradnik, S. (eds) (2019), *Container and modular buildings – Construction and design manual*, Dom Publishers, Berlin.
- Enshassi, M. S. A., Walbridge, S., West, J. S. and Haas, C. T. (2019), "Integrated risk management framework for tolerance-based mitigation strategy decision support in modular construction projects", in *Journal of Management in Engineering*, vol. 35, issue 4, pp. 1-16. [Online] Available at: [doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000698](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000698) [Accessed 9 October 2023].
- Ermolli, S. R., and Galluccio, G. (2019), "Industrializzazione edilizia e prefabbricazione tra materialità e immaterialità | Building Industrialization and Prefabrication between Materiality and Immateriality", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 93-100. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5102019 [Accessed 9 October 2023].
- Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T. D., Manalo, A. and Mendis, P. (2019), "New advancements, challenges and opportunities of multistorey modular buildings – A state-of-the-art review", in *Engineering Structures*, vol. 183, pp. 883-893. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.061 [Accessed 9 October 2023].
- Gibb, A. and Pendlebury, M. (2013), *Glossary of Terms 2013*, buildoffsite. [Online] Available at: buildoffsite.com/content/uploads/2015/03/BoS-Glossary-of-terms-2013-web.pdf [Accessed 9 October 2023].
- Hauschildt, K., Gwosc, C., Schirmer, H. and Wartenbergh-Cras, F. (2021), *Social and economic conditions of student life in Europe – Eurostudent VII Synopsis of Indicators 2018-2021*. [Online] Available at: eurostudent.eu/download_files/documents/EUROSTUDENT_VII_Synopsis_of_Indicators.pdf [Accessed 9 October 2023].
- Hou, H. C., Zhang, D. and Lai, J. H. K. (2023), "Qualitative and quantitative investigation into the indoor built environment of modular student housing – A multiple-room case study", in *Energy and Buildings*, vol. 280, article 112734, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112734 [Accessed 9 October 2023].
- Illankoon, I. C. S. and Lu, W. (2020), "Cost implications of obtaining construction waste management-related credits in green building", in *Waste Management*, vol. 102, pp. 722-731. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.024 [Accessed 9 October 2023].
- Jaillon, L., Poon, C. S. and Chiang, Y. (2009), "Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong", in *Waste Management*, vol. 29, issue 1, pp. 309-320. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.015 [Accessed 9 October 2023].
- Kamali, M. and Hewage, K. (2016), "Life cycle performance of modular buildings – A critical review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 1171-1183. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.031 [Accessed 9 October 2023].
- Kim, M. K. and Kim, M. J. (2016), "Affordable Modular Housing for College Students Emphasizing Habitability", in *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 15, issue 1, pp. 49-56. [Online] Available at: doi.org/10.3130/jaabe.15.49 [Accessed 9 October 2023].
- Klakegg, O. J. (2013), "Modern Construction Management", in *Construction Management and Economics*, vol. 31, issue 12, pp. 1215-1217. [Online] Available at: doi.org/10.1080/01446193.2013.867519 [Accessed 9 October 2023].
- Kotradyova, V., Vavrinsky, E., Kalinakova, B., Petro, D., Janskova, K., Boles, M. and Svobodova, H. (2019), "Wood and its Impact on Humans and Environment Quality in Health Care Facilities", in *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, issue 18, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/ijerph16183496 [Accessed 9 October 2023].
- Lawson, R. M., Ogden, R. and Goodier, C. (2014), *Design in modular construction*, CRC Press, London. [Online] Available at: doi.org/10.1201/b16607 [Accessed 9 October 2023].
- Lawson, R. M., Ogden, R. G. and Bergin, R. (2012), "Application of modular construction in high-rise buildings", in *Journal of Architectural Engineering*, vol. 18, issue 2, pp. 148-154. [Online] Available at: [doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000057](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000057) [Accessed 9 October 2023].
- Li, Z., Shen, G. Q. and Xue, X. (2014), "Critical review of the research on the management of prefabricated construction", in *Habitat International*, vol. 43, pp. 240-249. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.04.001 [Accessed 9 October 2023].
- Lobsinger, M. L. (2000), "Cedric Price – An Architecture of Performance", in *Daidalos*, n. 74, pp. 22-29. [Online] Available at: academia.edu/1442541/_Cedric_Price_An_Architecture_of_Performance_ [Accessed 9 October 2023].
- Mesa, J. A., Esparragoza, I. and Maury, H. (2020), "Modular Architecture Principles – MAPs – A key factor in the development of sustainable open architecture products", in *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 13, issue 2, pp. 108-122. [Online] Available at: doi.org/10.1080/19397038.2019.1634157 [Accessed 9 October 2023].
- Price, C. (1970), "The Cedric Price Column", in *Archigram*, vol. 9, p. 1.
- Qin, H. and Yao, Y. (2020), "The analysis of differentiation between Prefabrication and Modular Construction", in *IOP Conference Series – Earth and Environmental Science*, vol. 580, article 012005, pp. 1-7. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/580/1/012005 [Accessed 9 October 2023].
- Rahman, M. M. (2014), "Barriers of implementing modern methods of construction", in *Journal of Management in Engineering*, vol. 30, issue 1, pp. 69-77. [Online] Available at: [dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000173](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000173) [Accessed 9 October 2023].
- Rogers, E. N. (1947), "Architettura educatrice", in *Domus*, n. 220, p. 1.
- Salama, T., Salah, A., Moselhi, O. and Al-Husseini, M. (2017), "Near optimum selection of module configuration for efficient modular construction", in *Automation in Construction*, vol. 83, pp. 316-329. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.008 [Accessed 9 October 2023].
- Short, C. (2021), "The Ulm School of Design Discourse – A Foundation for Sustainable Design", in *The Design Journal | An International Journal for All Aspects of Design*, vol. 24, issue 3, pp. 343-361. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14606925.2021.1881204 [Accessed 9 October 2023].
- Scalisi, F. and Sposito, C. (2021), "Strategie e approcci 'green' – Un contributo dall'off-site e dall'upcycling dei container marittimi dismessi | Green strategies and approaches – A contribution from the off-site and upcycling of discarded shipping containers", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 10, pp. 92-119. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1092021 [Accessed 11 October 2023].
- Styles, A. J., Luo, F. J., Bai, Y., Murray-Parkes, J. B., Mair, R. J., Soga, K., Jin, Y., Parkilad, A. K. and Schooling, J. M. (2016), "Effects of joint rotational stiffness on structural responses of multistorey modular buildings", in *International Transforming the Future of Infrastructure through Smarter Information – Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction, 27-29 June 2016*, ICE Publishing, Cambridge, pp. 457-462. [Online] Available at: icvirtualibrary.com/doi/abs/10.1680/tfitti.61279.457 [Accessed 9 October 2023].
- Subramanya, K., Kermanshachi, S. and Rouhanizadeh, B. (2020), "Modular Construction vs. Conventional Construction – Advantages and Limitations – A Comparative Study", in Skibniewski, M. J. and Hajdu, M. (eds), *Proceedings of the Creative Construction e-Conference 2020 – CCC20*, pp. 11-19. [Online] Available at: doi.org/10.3311/CCC2020-012 [Accessed 9 October 2023].
- Wallace, D. (2021), *The Future of Modular Architecture*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781003031932 [Accessed 9 October 2023].
- Vráblová, E., Czafik, M. and Puškár, B. (2022), "Spatial Characteristics of Contemporary Prefabricated Modular Dormitory Cells", in *Spatium*, n. 47, pp. 64-74. [Online] Available at: doi.org/10.2298/SPAT210510005V [Accessed 9 October 2023].
- Yu, G., Dai, C., Huang, S., Gan, L. and Gao, W. (2019), "Research on Innovative Application of Modular Design in University Student Apartment Furniture", in *IOP Conference Series – Materials Science and Engineering*, vol. 573, article 012016, pp. 1-7. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1757-899X/573/1/012016 [Accessed 9 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	10 September 2023
Revised	08 October 2023
Accepted	26 October 2023
Published	31 December 2023

FARE MOLTO CON POCO

Un'architettura modulare,
a partire da Walter Segal

MAKING A LOT WITH LITTLE

Modular architecture,
starting with Walter Segal

Niccolò Di Virgilio

ABSTRACT

Il presente contributo prende le mosse dalla particolare parabola progettuale dell'Architetto di origine ebraica Walter Segal e dalla sua carriera professionale lunga oltre cinquant'anni a Londra. A partire dalle prime sperimentazioni ad Ascona in Svizzera, Segal giunge alla messa a punto di un sistema di costruzione in legno, basato sulla modularità e componibilità dei materiali nei formati disponibili in commercio. Tale metodo riscuote immediato interesse per l'estrema semplicità ed economicità, fino ad arrivare ad essere auto-costruibile. Il paper si propone di rintracciare alcune delle sotterranee radici che legano la sua pratica progettuale a correnti della complessa geografia del progetto contemporaneo, basate sulla filosofia del 'fare', sulla sostenibilità insita nei suoi principi e su un'estetica pragmatica che valorizza eventi e circostanze per ottenere 'molto' con 'poco'.

This paper examines the remarkable design journey of the Jewish architect Walter Segal and his fifty-year career in London. After his early experiments in Ascona (Switzerland), Segal developed a system of construction in wood that was based on using the modular components of materials in the forms that were available on the market. This method attracted considerable interest, being both simple and economical, and went on to become a system of self-build construction. The paper attempts to follow some of the hidden channels that link Segal's practice with movements within the complex geography of contemporary architectural design: movements that focus on reclaiming 'making', on the sustainability intrinsic in Segal's principles, and on a pragmatic aesthetic that takes account of events and external circumstances to achieve 'more' with 'less'.

KEYWORDS

modularità, metamorfosi, autocostruzione, economia materiale, progetto per la disassemblabilità

modularity, metamorphosis, self-build, economy of materials, design for disassembly



Niccolò Di Virgilio, Architect and PhD Candidate in Architecture Theories and Design at the DiAP (Department Architecture and Project) 'Sapienza' University of Rome (Italy), focuses his research interests on the relationship between theory and practice in architectural design and its problematic transferability. He has undertaken a research period at the Manchester School of Architecture (UK) focusing on the architect Walter Segal and his vision. E-mail: niccolo.divirgilio@uniroma1.it

La vicenda di Walter Segal (1907-1985), Architetto noto per aver sviluppato un efficace metodo di autocostruzione negli anni '70, è stata in buona parte trascurata dalla cultura del progetto di architettura del XX secolo. Poco dopo la sua scomparsa nel 1988 è stata organizzata un'importante mostra sul suo lavoro alla Royal Festival Hall, frutto della sistematizzazione dell'archivio personale¹, seguita dalla pubblicazione di una biografia in tedesco / inglese (McKean, 1989) e di un testo sul metodo di costruzione (Broome and Richardson, 1991). Ben presto si è determinato un vuoto critico nonostante molti architetti e comuni cittadini, specialmente in Inghilterra, abbiano portato avanti l'insegnamento del Maestro e ne abbiano aggiornato le idee. Solo recentemente la sua produzione è stata recuperata dalla giornalista Alice Grahame², che ha curato una mostra all'Architectural Association nel 2016 e due pubblicazioni: un volume che documenta la vicenda delle costruzioni a Lewisham (Londra) corredato da un reportage del fotografo Taran Wilkhu (Grahame and Wilkhu, 2017) e un'edizione ampliata della bibliografia insieme a Jhon McKean (Grahame and McKean, 2021).

La figura dell'Architetto Walter Segal è complessa e sfaccettata poiché, se da un lato è frutto e risultato di una vicenda personale alimentata dalla familiarità con i grandi Architetti degli anni '20, dall'altra si consuma nel rifiuto di ogni ideologia e retorica. La sua attività si sostanzia in un attivismo critico nei confronti della burocrazia e delle Istituzioni per arrivare a rendere le sue architetture auto-costruibili su diretta richiesta degli stessi clienti, estraniandosi così dalle dinamiche e dalle logiche della costruzione industriale (Kainrath, 1981). L'approccio pragmatico di Segal al progetto (Beigel, 1988) risulta particolarmente attuale, anche in parallelo a tendenze contemporanee che predicano un ritorno al 'fare' architettura per mezzo di un rinnovato contatto con la produzione e l'adozione di 'modi' fondati sul 'fare molto con poco', spesso a partire da ciò che già c'è (Balducci and Camilli, 2022).

Tale condizione porta con sé anche una naturale e istintiva sostenibilità dell'atto di costruzione, che si fonda su applicazioni più o meno intuitive legate a un empirismo consapevole, frutto di un infaticabile atteggiamento critico tipico del 'buon costruttore'. Il carattere della produzione Segal, pur in uno scenario attuale molto più aggiornato rispetto a quello del dopoguerra in cui l'Architetto ha operato, costituisce un caso particolarmente significativo rispetto alle sempre più stringenti questioni legate ai temi ambientali con cui immancabilmente i progettisti si devono confrontare: sempre più nei risultati e non solo negli intenti.

Il finale approdo di Walter Segal all'autocostruzione, spinto da alcune richieste dei clienti e non preterintenzionato, conduce a un modello di sostenibilità del progetto basato sull'esperienza diretta e sull'imprescindibile vicinanza e sovrapposizione tra chi finanzia l'opera, chi la progetta e chi la costruisce. Una questione che conserva, dunque, anche una forte attitudine didattica, che può essere messa in relazione con le recenti sperimentazioni del Valldaura Labs in cui si impiega il concetto di 'imparare facendo' orientato alla definizione di «[...] paesaggi ecologici e tecnologici olisticamente integrati» (Ibañez, Gualart and Salka, 2022, p. 136) e alla progettazione di edifici prototipi autosufficienti. Tale questione rievoca anche

alcune sperimentazioni didattiche di Global Tools orientate al «[...] momento ideale in cui l'educazione coinciderà con la vita» (Borgonovo and Franceschini, 2018, p. 16), aspetti che la produzione Segal aveva già affrontato a partire dagli anni '70, elaborando una precisa pratica progettuale.

Sulla base di queste premesse e dello stato dell'arte disponibile sul suo operato, il presente contributo intende recuperare l'insegnamento di Walter Segal ponendolo in relazione ad alcune linee di ricerca basate sull'utilizzo di elementi e componenti modulari e sull'ottimizzazione della materia da impiegare nella costruzione (sia nella logica di minor consumo possibile di risorse che nella dinamica circolare di metamorfosi dei materiali) nell'ottica di un naturale perseguimento di strategie sostenibili.

Con l'obiettivo di far emergere la chiara attinenza della sua vicenda ad alcuni temi contemporanei del progetto di architettura, il contributo sarà strutturato in cinque parti: la presentazione della sua attività, l'indagine del suo particolare sistema di costruzione, la continuità della sua pratica da parte di alcuni allievi e seguaci e la prospettiva di un'architettura pragmatica basata su simili principi, esaminata in una serie di casi studio recenti. Verranno infine presentate alcune riflessioni conclusive che evidenziano le barriere che frenano l'applicazione di tale metodo e possibili nuove linee di ricerca che scaturiscono da questo paradigma.

La vita di un outsider e la sua atipica traiettoria progettuale

La carriera di Walter Segal si svolge a Londra, dove arriva ufficialmente in vacanza nell'estate del 1936 e rimane per il resto della vita. I suoi spostamenti sono dettati dall'affermarsi del regime nazista in Germania, a cui si sottrae trasferendosi dapprima in Svizzera (Ascona), poi in Spagna (Palma de Maiorca) e infine in Inghilterra, subito dopo una parentesi in Egitto come rilevatore di oggetti egizi nelle campagne archeologiche di Ludwig Borchardt a Il Cairo. La formazione avviene in tre Università europee (Berlino, Delft e Zurigo) grazie a una borsa di studio itinerante vinta alla fine degli studi superiori e anche se la famiglia versava in condizioni economiche precarie la sua determinazione, unitamente alle lettere di presentazione di Erich Mendelsohn e Walter Gropius³, gli permettono di intraprendere gli studi da architetto.

Il suo interesse è principalmente rivolto agli aspetti ingegneristici della costruzione, a come 'si fanno' le cose, e proprio per tale ragione declina la proposta di Gropius di studiare al Bauhaus. Tanto i primi progetti universitari quanto le prime architetture in Inghilterra dimostrano una facile applicazione delle forme moderne, come Adolf Behne riferirà alla madre visionando le sue prime espressioni (McKean, 1989). Contro la faticosa produzione in cemento e mattoni si cela una propensione verso la costruzione chiara e comprensibile delle strutture in legno, interesse coltivato già nei Laboratori di Hans Pelzig alla Technische Hochschule di Berlino e nei testi del suo allievo Konrad Wachsmann (1995) sulle costruzioni prefabbricate in legno.

Quella delle costruzioni a secco è una linea continua che attraversa tutta la sua carriera: da un primo concorso per un modulo abitativo, pubblicato su *Bauwelt* nel 1931 alla prima architettura realizzata ad Ascona nel 1932, fino alle esperienze degli anni '60. Nel 1957 costruisce una Sky-

house in Svizzera e nel 1962 una casa temporanea nel suo giardino ad Highgate (Fig. 1), in vista della ricostruzione della casa vittoriana di Moran Scott, sua seconda moglie. Solo al culmine della carriera, riprendendo le prime sperimentazioni, Segal giunge alla messa a punto di un vero e proprio metodo di costruzione alternativo in legno (il metodo Segal), basato sulla modularità e componibilità insita nel formato dei materiali industriali. Tale metodo, sperimentato per la prima volta nella costruzione temporanea nel suo giardino di casa, riscuote immediato interesse per l'estrema semplicità ed economicità: l'intera struttura venne eretta in dieci settimane al costo di appena 10 sterline al metro quadro (Pawley, 1984).

Il metodo modulare: dalla scala del componente a quella dell'aggregato

Il modulo base delle costruzioni Segal è il pannello di compensato, il più semplice dei materiali da costruzione. La misura di cm 60 + 5 di tolleranza⁴ diviene l'unità di una griglia quadrata sulla quale viene disegnato ciascun layout. Non si tratta dunque di un sistema organizzato sulle misure umane (come il 'modulor' di Le Corbusier), né di moduli articolati forgiati ad hoc per intraprendere una nuova costruzione. Il sistema si fonda sui materiali già in commercio e sulle misure disponibili: la costruzione diviene dunque un assemblaggio di 'ready made', che ottimizza il numero di tagli e mantiene saldi tra loro i diversi elementi tramite forze di attrito; evitando l'utilizzo di chiodi e viti sui pannelli si rende possibile il successivo riutilizzo dei moduli integri.

L'ambizione di Walter Segal è realizzare una costruzione rigorosa ma semplice: la modularità permette l'estrema economicità e facilita la successiva manutenzione da parte di chi abita gli spazi. Le case Segal hanno un elevato grado di flessibilità poiché si possono ampliare o riconfigurare con grande facilità: l'Architetto racconta con orgoglio di alcuni clienti che rimuovono le pareti per organizzare una festa e poi riallestiscono la casa una volta che l'evento è concluso (McKean, 1989).

La semplificazione del metodo costruttivo si associa all'economia nell'ideazione: 20/30 fogli formato DIN A4 (facilmente copiabili), redatti a mano libera e comprensivi di dettagli e distinta delle quantità, sono sufficienti per ottenere i permessi e guidare la costruzione (Kainrath, 1981). La più importante realizzazione sono tredici unità autocostruite a Lewisham (Figg. 2-5) in un programma di edilizia sociale promosso dall'anarchico Brian Richardson, vice Architetto del Comune, il cui incontro era stato possibile grazie alla comune amicizia con Colin Word. Per l'intervento Segal si avvale della collaborazione di Jon Broome (1986), che lo supporta nell'applicazione del metodo; il progetto affronterà diversi ostacoli burocratici prima di essere avviato nel 1979. Le due strade su cui trovano posto le costruzioni alternative sono state chiamate Walters Way e Segal Close in ricordo dell'Architetto scomparso durante i lavori.

Le abitazioni sono ancora oggi mantenute e custodite con cura dai propri abitanti, attestando come il metodo Segal non sia stato abbandonato alla scomparsa del suo artefice, ma continui a essere apprezzato da normali cittadini, architetti e seguaci entusiasti. La modularità di Segal non è certo quella di un futuro prefabbricato (De Graaf, 2017) e la sua prospettiva si nutre di una distanza rispetto ai monotoni processi della produzione in-

dustriale: ogni edificio è differente ed è prodotto da persone diverse, con molto lavoro e laboriosa attenzione.

L'eredità di una visione: allievi e seguaci | Tuttavia Segal non è solo un progettista poiché nel

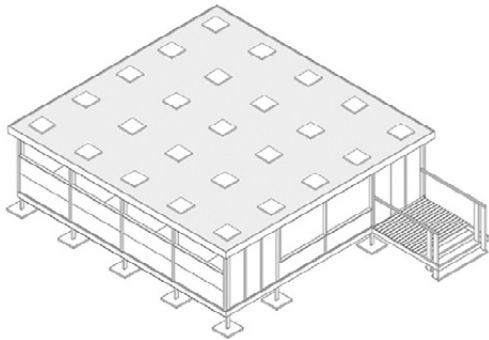


Fig. 1 | Walter Segal, temporary house in the garden (1962) in Highgate, London (credit: the Author, 2023).

Fig. 2 | Walter Segal climbs a ladder to join a group of self-builders in Lewisham, London (credit: J. McKean).

Fig. 3 | Self-built structures in Lewisham, London (credit: J. McKean).

corso della carriera ha insegnato e pubblicato su numerosi quotidiani e manuali (Blundell Jones, 1988). Dalla sua vasta produzione scritta emerge *Home and Environment* (Segal, 1948), una ricca antologia di tipologie edilizie, layout e dettagli tecnici e una serie di taglienti lettere, recensioni e articoli critici come quelli sui neopuristi (Segal, 1972) o relativi alla recessione postmoderna (Segal, 1982).

Il metodo non convenzionale di Segal ha ispirato diverse iniziative già a partire dagli anni '70. Nel 1973 un gruppo di studenti della Western Australia Institute of Technology contatta telefonicamente Segal per costruire una struttura a Perth, come tema della tesi di laurea, e dopo circa novanta minuti di chiamata internazionale la costruzione prende avvio (McKean, 1989). Altro esempio è il progetto della *Bauhäusle* alla Scuola di Stoccarda (Awan, Schneider and Till, 2011) la cui costruzione è iniziata nel 1981: i dormitori auto-costruiti dagli studenti sotto la guida dei Professori Peter Sulzer e Peter Hübner sono stati ispirati da un workshop che Walter Segal ha tenuto alla Scuola di Architettura tedesca nel 1979.

Molti degli allievi che hanno incontrato Walter Segal nel ruolo di docente o conferenziere dichiarano di essere rimasti attratti dalla sua magnetica personalità e ne hanno condiviso l'approccio progettuale. È il caso degli architetti Duncan Roberts e Mary Kelly (allievi alla Scuola di Architettura di Hull) e della loro casa a Belford (Figg. 6, 7), nel Nortumberland, una costruzione prodotta (letteralmente) dallo smantellamento e dal ricollocamento di alcune delle strutture originali di una casa con studio medico a Clifford, nello Yorkshire; ad oggi i progettisti stanno pianificando una nuova addizione. Nel 1993 anche Jonathan Lindt e la moglie Harriet Walsh, insieme a Heimir Salt e Nick Arrow, hanno realizzato con il metodo Segal tre abitazioni attigue in un lotto a Leeds (Figg. 8, 9).

Diversi sono quindi i programmi di costruzione alternativa o le libere iniziative che alimentano un 'mat urbanism' (Allen, 2001) in grado di estendere la scala del modulo da quella di componente a quella di aggregato: come sostiene Harriet Walsh⁵ una casa Segal è riconoscibile tanto quanto è facile individuare una casa edoardiana. Secondo Colin Ward (2016) con il metodo Segal l'Architetto diviene un intermediario in grado di promuovere energie e generare processi sostenibili, ma anche di conquistare nuovi spazi in lotti residuali o particolarmente scoscesi che hanno un basso valore economico.⁶

Verso un'architettura del 'fare' | Molte sono le domande di ricerca che prendono spunto dall'attività di Walter Segal e che trovano riscontro nella pratica del progetto contemporaneo. L'affinamento dei suoi metodi è riferibile all'implementazione di strategie bioclimatiche innovative e al perfezionamento delle prestazioni energetiche dei manufatti, aspetti comunque già impliciti nel suo approccio. Gran parte del suo insegnamento risiede inoltre nell'attitudine verso una costruzione onesta, con piastre bullonate e nodi lasciati a vista, insieme a genuine invenzioni quali, ad esempio, i 'tetti allagabili'.

La peculiare traiettoria pratica di Walter Segal è di seguito messa in relazione con alcuni casi studio recenti, scelti tra esperienze progettuali realizzate negli ultimi quindici anni che si siano esclusivamente confrontate con la costruzione di archi-

tetture, prototipi o modelli a grande scala. Non è stata posta una limitazione geografica nella scelta dei casi studio, tuttavia, dotati di un'estrazione prevalentemente nordeuropea e giapponese, dovuta alla particolare affinità della produzione Segal con i tradizionali metodi di costruzione di queste specifiche località in cui le costruzioni a secco sono naturalmente diffuse. Ciascuno dei casi presi in esame è dotato di una sua peculiare traiettoria verso un'architettura del 'fare' e si caratterizza per una fabbricazione digitale di carattere modulare, una costruzione del tipo 'ready made', 'trasparente' e 'frugale', un'autocostruzione di ambienti domestici smontabili e un'ottimizzazione degli elementi strutturali.

La fabbricazione digitale è una delle linee che più richiama la semplificazione del processo costruttivo introdotta da Walter Segal poiché coniuga complessità progettuale e semplicità esecutiva (Pone, 2022) ed è spesso associata alla possibilità di autocostruzione, ponendo la produzione di architettura direttamente in mano all'Architetto o alle persone. Sistemi costruttivi oggi in commercio quali Mass Bespoke, WikiHouse o U-Built si basano sulla produzione di un kit ordinato di pezzi da assemblare direttamente sul sito.

Nello specifico Mass Bespoke⁷ (Fig. 10) è un sistema inventato da Baumann Lyons Architects nel 2011 per rispondere alla richiesta di una piccola unità per la quale il budget stanziato non avrebbe permesso una costruzione tradizionale. WikiHouse⁸ (Fig. 11), invece, è un sistema open source fondato nel 2011 da Alastair Parvin e Nick Ierodiaconou; la società no profit Open System Lab, che mantiene il progetto attivo, definisce così sul proprio sito web la missione: «[...] to collaboratively develop new ways of doing, and get them into the hands of every citizen, community, business and government». Lo stesso Alastair Parvin definisce WikiHouse un sistema Segal 2.0: «If Segal were here today I believe he would be very interested in system like WikiHouse. We can combine Segal principles and the tools we have today to carry on his mission and take the future further» (Grahame and McKean, 2021, p. 191).

Anche U-Built⁹ (Fig. 12) è un sistema simile, pensato per semplificare il processo di costruzione e permettere alle persone di partecipare attivamente al processo. Progettato dallo Studio Bark e basato su scatole di compensato unite tramite ancoraggi puntuali, anch'esso si inserisce nel solco di una tradizione Segal agevolando lo smontaggio e il riutilizzo di elementi interi (Grahame and McKean, 2021), pur comportando una lavorazione iniziale di sagomatura dei pannelli. In fin dei conti già in un articolo sull'*Architects Journal* del 30 gennaio 1985, dal titolo *Intelligent Building Boxes*, si esaminano le ricerche di Jhon Frazer, ricercatore del Computer-Aided Design Center dell'Università di Ulster, che aveva messo a punto un software in grado di tradurre il metodo Segal in un modello virtuale gestito da un computer per rispondere alla manipolazione di un modello fisico in scala: dagli spostamenti si ricavano in tempo reale i dati necessari per procedere alla costruzione. Si tratta, già in questo caso, di un sistema di blocchi intelligenti che si avvale dell'aiuto di un computer per la produzione di un progetto in DIY (Do It Yourself), aiuto che, secondo la redazione del giornale, potenzia le possibilità di dialogo tra architetto e cliente.

Una seconda linea di ricerca di cui Segal fu un pioniere può essere identificata nella definizione di costruzioni modulari a partire dal 'ready-made': materiali, elementi e/o componenti già esistenti vengono assemblati tra loro per configurare uno spazio. Ne sono esempio una serie di sperimentazioni progettuali dell'Architetto giapponese Kengo Kuma, che in alcuni prototipi attinge a modularità preesistenti per creare nuovi modelli abitativi temporanei o rifugi, come nel caso della Casa Umbrella¹⁰ del 2008 (Fig. 13) o della Hojo-An¹¹ del 2013 (Fig. 14). Nel primo caso si tratta di un prototipo per un rifugio impermeabile, ottenuto unendo con zip quindici ombrelli privati di manico; nel secondo di una capanna dalle dimensioni ridotte, frutto dell'assemblaggio di piccoli listelli di cedro rosso dotati di magneti e di un foglio traslucido di ETFE.

Questi prototipi, che a differenza di quelli di Segal non sono pensati per essere utilizzati quotidianamente, ne condividono l'intenzione di risolvere questioni difficili nel modo più semplice possibile. Tali microarchitetture stimolano inoltre esperienze di didattica sperimentale quale il progetto Tea Gloo, realizzato in un workshop tra il Politecnico di Milano e la Tokyo University e coordinato da Kengo Kuma insieme allo strutturista Jun Sato: la modularità del Ken giapponese è la base di un'architettura costruita da soli cestini, uniti da fascette e rinforzi (Imperadori and Brunone, 2018), assemblata facilmente e subito disassemblabile una volta terminato l'uso. Queste esemplificazioni dimostrano un rapporto stretto tra making e didattica dove il ricorso al modulo, anche in questo caso, diviene vettore di una progettazione articolata ma di facile realizzazione in sito.

La figura dell'Architetto come attore principale nelle diverse fasi del processo edilizio, di stampo quasi artigianale, si ritrova nella produzione di Peter Grundmann, che adotta materiali industriali e realizza in autocostruzione diversi componenti direttamente con le proprie mani. La Casa Neiling II¹² (Figg. 15, 16) costruita a Löwenberger, a nord di Berlino nel 2015, è una abitazione economica, facile da montare, da smontare e dunque da riutilizzare. Anche questo progetto è un chiaro esempio di Design for Reuse o Design for Disassembly orientato alla progettazione di un edificio avendo sempre in mente anche il progetto del suo disallestimento e riallestimento.

Richiamando le costruzioni leggere del metodo Segal, l'edificio è sollevato di 1,3 metri da terra e circonda un fienile esistente in setti di laterizio mentre le chiusure verticali sono interamente vetrare. Oltre alla casa Peter Grundmann e Thomas Pohl hanno progettato e autocostruito anche i mobili interni in compensato della cucina, dei bagni e della camera da letto, il tutto con la possibilità di smontare e rimontare il manufatto e gli arredi in qualsiasi momento.

L'apprezzamento per il frugale è una ulteriore costante nella produzione di Segal, già teorizzata da Colin Ward: «[...] l'architettura viva e frugale si mescola con una sommessa e giocosa epica del quotidiano» (Borella, 2016, p. 12). Il quotidiano, la qualità delle piccole architetture e la valorizzazione delle piccole cose divengono un aspetto saliente della sua professione di Architetto; infatti proprio nel corso di un'intervista a Charlotte Ellis (1982, p. 34) Segal esclama: «I am terribly glad to have had a large number of small commissions»; un aspet-

to, questo, che si ritrova nella produzione di Giacomo Borella, cofondatore dello Studio Albori a Milano e in particolare nella Casa con struttura in legno e paglia e con serramenti di recupero (Fig. 17) a Laveno¹³ sul Lago Maggiore. Gli oggetti riciclati diventano in questo caso i moduli dimensionali su cui l'architettura si organizza, permettendo di riassorbire organicamente nell'edificio elementi già esistenti, preservandone l'energia incorporata necessaria per la produzione e restituendone al contempo dignità e significato.

Un'ulteriore linea di ricerca che il sistema Segal definisce è quella dell'economia strutturale, che si traduce nell'impiego della minor quantità di materiale possibile, sia nella definizione di una struttura sia nel calcolo di una sezione. Un tale interesse per le 'tecnologie più appropriate' (McKean, 1986) trova riferimento anche in alcune interessanti produzioni contemporanee: è il caso della Weekend House a Viggso¹⁴ del 2016 (Figg. 18, 19) opera del duo svedese Arrhov Frick (Ruby and Ruby, 2020) che, nel contributo dal titolo Be Reasonable – Standard Wood Elements Sized to Do What They Need to Do, descrivono questa propensione all'economia strutturale.

La distanza del sito di costruzione dalla linea di costa e il relativo dislivello di 15 metri imponeva di ottimizzare il peso del materiale da costruzione per rendere meno faticoso il trasporto al cantiere: «The goal was to create sustainability by using only the amount of material that was strictly necessary, showing how simple, standard components can become architecture» (Ruby and Ruby, 2020, p. 372); tutta la struttura è stata quindi realizzata con travi lamellari dello spessore di appena 11,5 cm, caratteristica che si ritrova anche in altre produzioni dello Studio, tra cui una casa privata realizzata a Ingarö¹⁵ del 2014 (Fig. 20) o una proposta per una struttura a Norrtälje¹⁶ del 2018.

La 'trasparenza nella costruzione' trova riferimento anche nelle ricerche progettuali dello studio danese Philmann Architects e in particolare nella Home Minus 12,5 mm¹⁷ (Figg. 21, 22) un progetto sperimentale restituito in tre modelli in scala 1:6 privati dell'ultimo strato di finitura ma arredati con mobili e oggetti ordinari quali buste, vestiti o piante da interno: la sottrazione dello strato di finitura, una generica lastra di cartongesso da 12,5 mm, mette a nudo tutte le componenti della costruzione che sono presentate direttamente nell'ambiente domestico.

La sperimentazione, pubblicata sul volume Connectedness – An Incomplete Encyclopedia of the Anthropocene (Krogh, 2021) ed esposta nel Padiglione della Danimarca in occasione della Biennale di Venezia del 2021, seppur limitata alla produzione di alcuni plastici in scala, fa emergere implicitamente alcune questioni già sollevate dall'attività di Segal, quali la riconoscibilità degli elementi costruttivi e la loro diretta esposizione, l'incompletezza intrinseca dell'ambiente domestico o l'aspetto didattico dell'atto di costruzione, tutti elementi che creano nell'utilizzatore la consapevolezza di come 'le cose sono fatte' e di come possono essere riparate.

Riflessioni conclusive e nuovi scenari per un'architettura e un'estetica pragmatica | L'atipica esperienza di Walter Segal è dunque una convincente anticipazione di correnti rintracciabili nell'eterogenea produzione e sperimentazione del pro-

getto contemporaneo. Pur non esistendo un legame diretto tra i diversi casi illustrati, di fatto essi traggono tutti origine dal pragmatismo del 'fare' e dalla ricerca di una naturale materializzazione fisica del progetto che ha quasi sempre come effetto il superamento creativo di vincoli burocratici. Una serie di radici sotterranee legano tutte queste sperimentazioni, anche nella comune pratica della sostenibilità del progetto, affrontata con i mezzi più adatti, più semplici, che non ricorrono a grandiosi sistemi né a imponenti attrezzature ma si basano sul buonsenso e su una naturale sensibilità.

L'esperienza di Walter Segal diviene così prototipo ante litteram di un progetto consapevole che ha come risultato lo sviluppo sostenibile in termini



Figg. 4, 5 | Views of Walters Way and Segal Close, London (credits: T. Wilkhu, 2016).



Fig. 6 | House with 'Segal method' by Duncan Roberts and Mary Kelly, first addition with roof sheathing, Belford (credit: S. Newman, 2004).

Fig. 7 | Interior of the third addition to the Duncan Roberts and Mary Kelly house, Belford (credit: the Author, 2023).

ambientali, economici e sociali e quindi in temi come la riduzione del consumo di suolo, la riduzione degli scarti, l'accessibilità o l'ottimizzazione del ciclo di vita e l'impiego di materiali, elementi e componenti facilmente riparabili (Baratta, 2021). L'operatività di Walter Segal è in questo senso particolarmente significativa, in quanto definisce un processo di continuo assemblaggio e disassemblaggio di materiali da costruzione che determina un cambio di paradigma orientato a una logica circolare e sviluppa un sistema che tende al 'cradle to cradle' superando quello lineare 'dalla culla alla tomba' (Sposito and Scalisi, 2020).

La sua attenzione agli aspetti quotidiani e la sua predilezione per i piccoli progetti ci insegna inoltre che i cambiamenti avvengono a partire da piccole cose e non con grandi sistemi o per mezzo di grandiosi racconti. La sua attività mira quindi attivamente a un cambio di paradigma, volto all'amplificazione delle possibilità e delle responsa-

bilità di ciascun individuo, in una strategia dal basso verso l'alto.

Le principali barriere che frenano oggi lo sviluppo di una tale prospettiva sono legate ad aspetti normativi o burocratici, di tipo culturale o identificabili negli stringenti criteri di sicurezza imposti da un cantiere aperto o da quelli dettati dalle certificazioni di conformità e posa a regola d'arte. La prima limitazione alla diffusione di tale modello è prodotta dall'ingente ed eterogeneo quadro normativo che regola il complesso mondo delle costruzioni. Gli edifici di Walter Segal, già negli anni '70, avevano dovuto affrontare complicati processi autorizzativi dovuti alla loro atipicità. Il quadro normativo è ulteriormente evoluto divenendo sempre più stringente e differenziato nell'intero panorama internazionale. Il caso Segal ci rivela tuttavia la necessità di lavorare sui confini normativi, di affrontarne le prescrizioni in senso creativo e mai dogmatico, in un attivismo critico che è propedeutico allo stesso aggiornamento delle norme. In tal senso diverse sono le manifestazioni recenti in questa direzione, a partire dal Creative Bureaucracy Festival¹⁸ che si tiene a Berlino con cadenza annuale.

La seconda barriera di tipo culturale, che crea un'iniziale distanza rispetto a tale possibilità, viene implicitamente superata nella partecipazione e inclusione insista nel sistema Segal, nel momento stesso in cui inizia una simile pratica. I cantieri Segal erano luoghi aperti e conviviali a cui partecipavano attivamente intere famiglie, donne e bambini. Se da un lato questa dinamica ha reso particolarmente popolari le sue architetture, dall'altro introduce una terza limitazione dovuta a criteri di sicurezza, di corretta posa in opera o certificazione delle lavorazioni che rendono problematica la sua effettiva applicabilità.

Tuttavia il metodo Segal conserva comunque importanti sviluppi futuri legati alla didattica del progetto di architettura o inerenti alla sua attitudine alla professione di architetto, dimostrato anche dai casi studio precedentemente trattati: il suo esempio può guidare i progettisti nel confronto con il tema della sostenibilità, da cui non possono più esimersi, con senso critico e laterale, evitando meri valori prescrittivi e impegnandosi attivamente per il raggiungimento di pragmatici risultati costruiti. Non è un caso che un prototipo delle case Segal sia conservato anche al CAT¹⁹ (Center for Alternative Technologies) in Galles, il cui motto è 'soluzioni pratiche per il nostro pianeta in cambiamento'. L'architettura Segal è in definitiva una metamorfosi di materiali leggeri, collocati e ricollocabili con facilità; un'attività che definisce non solo un modo di 'fare' le cose ma anche una vera e propria estetica, che trova fecondi paralleli in molta produzione contemporanea. L'estetica pragmatista (Shustermann, 2010) rintracciabile nella produzione Segal resta legata alla centralità del corpo nello spazio, a un'interpretazione della costruzione come naturale attività dell'essere umano nel mondo, fondata su una sostanziale economia di risorse. «L'esperienza diretta, personale, corporea è alla base di ogni riflessione dell'architettura» scrive Giacomo Borella (2016, p. 9), introducendo alcuni scritti di Colin Ward nei quali compare anche l'outsider Walter Segal. Questione, questa, ribadita da Anne Lacaton (2020, p. 58): «Make do with the existing, with people, nature, climate, the economy, in order to reinvent, to do more with less». Ar-

rangiarsi, dunque, facendo con quello che si ha senza cessare mai di chiedersi: perché facciamo ciò che facciamo?²⁰

The story of Walter Segal (1907-1985), the architect who famously developed an efficient self-build construction method in the 1970s, has largely been neglected by architectural design culture in the 20th century. Following his death, a major exhibition of his work was mounted in 1988 at the Royal Festival Hall, based on his personal archive¹. This was followed by the publication of his biography in English and German (McKean, 1989) and by a volume on his construction system (Broome and Richardson, 1991). But thereafter there was a critical void, despite the fact that many architects and ordinary citizens (particularly in England) had followed his teachings and updated his ideas. Interest in his work has only recently been resuscitated by the journalist Alice Grahame², with an exhibition for the Architectural Association in 2016, and two publications: firstly a documentation of the buildings in Lewisham (London), illustrated by the photographer Taran Wikhu (Grahame and Wikhu, 2017), and secondly an extended edition of Segal's biography, with John McKean (Grahame and McKean, 2021).

Segal cuts a complex, multi-faceted figure: on one hand, his work was inspired by the great 20th-century architects; on the other, he was driven by a rejection of ideology and rhetoric. His practice was underpinned by an activism that was critical of institutional bureaucracy to the extent that his self-build designs were created directly for his clients, thus bypassing the operational rationales of industrial construction (Kaintath, 1981). Segal's pragmatic approach to design (Beigel, 1988) stands out as highly contemporary, reflecting our current tendencies which advocate a return to a 'making' architecture through renewed contact with production techniques, and adopting principles of 'making more with less', often with pre-existing materials as a starting point (Balducci and Camilli, 2022).

Within such an approach, the act of building is led by a natural, instinctive impulse to achieve sustainability. It is underpinned by more or less intuitive practices linked to conscious empiricism the result of the endlessly critical attitude that typifies the 'good builder'. Current construction practices are far more up-to-date compared to the post-war scenario in which Segal was operating, so the sustainable character of Segal's work is particularly remarkable given the ever more pressing environmental issues that planners are required to face in order to realise a design, not only on paper.

For Walter Segal, the ultimate goal in self-building was a model of sustainable design based on direct experience and the necessary connection and overlapping of client, designer, and builder. So, this was a concept which encapsulated a strong didactic impact, comparable to the recent experiments of Valldaura Labs with ideas of 'learning by doing' directed towards «[...] landscapes that holistically integrate ecology and technology» (Ibañez, Guallart and Salka, 2022, p. 136) and the planning of prototype self-sufficient buildings. His ideas also remind us of some of the didactic ex-

periments of Global Tools developed for the ideal time when education coincides with life (Borgonovo and Franceschini, 2018). All these are issues which Segal's work had been grappling with since the 1970's, in his development of a precise design method.

In light of these observations and taking into consideration the tools that were available to his practice, this paper aims to reclaim Walter Segal's teaching. I will also consider Segal in the context of research that explores the use of modular components and optimisation of raw materials in construction (with the aim of both minimising the use of resources as far as possible and creating a metamorphosis of materials through circular design), as the logical result of sustainable design strategies.

This paper aims to explore the clear connection of Segal's work to some contemporary themes in architectural design and will be structured in five sections: a presentation of his practice, an exploration of his unique construction method, the continuance of his practice by some of his students and followers, and the perspective of pragmatic architecture that is based on similar principles, through the lens of a series of recent case studies. The final section will present some reflections on the barriers to applying such a methodology, and some possible new lines of research that arise from this model.

Life as an outsider: an unconventional journey

Walter Segal's career was established in London, where he arrived, ostensibly for a holiday, in 1936 and stayed for the rest of his life. His wanderings were driven by the rise of the Nazi regime in Germany, which he avoided first by moving to Switzerland (Ascona), then Spain (Palma de Mallorca) and lastly to England. His move here followed a short time in Egypt where he was the surveyor with the archaeological campaigns organised by Ludwig Borchardt in Cairo. He gained his training in three European universities (Berlin, Delft and Zurich), thanks to an itinerant scholarship awarded to him at the end of his schooling. His family lived in precarious economic conditions, but young Segal's determination was aided by letters of presentation from Erich Mendelsohn and Walter Gropius³, and these factors combined to enable him to embark on his architectural training.

He was particularly fascinated by the engineering aspects of buildings – how things 'put together' – and for this reason declined Gropius' invitation to study at the Bauhaus. Both his first designs as an undergraduate and his first architectural buildings in England reveal a natural understanding of the modernist forms, as Adolf Behne noted in his description to his mother of Segal's initial work (McKean, 1989). Behind the laborious bricks and mortar production technique lay an inclination towards clear and transparent structures in wood. An inclination that had already been nurtured in the Laboratories of Hans Pelzig at the Technische Hochschule in Berlin, and the writings of his pupil Konrad Wachsmann (1995) on building with prefabricated wood.

Dry construction was the continuous thread which ran through Segal's whole career, from an early competition for a domestic dwelling, published in *Bauwelt* in 1931, to the first architectural buildings completed in Ascona in 1932, and throughout

his work in the 1960s. In 1957, he built Skyhouse in Switzerland, and in 1962 a temporary house in his garden in Highgate (Fig. 1), ahead of the reconstruction of the Victorian house of his second wife Moran Scott. It was only at the end of his career, when he went back to his first experiments, that Segal was able to set out a proper methodology for alternative buildings in timber (the Segal method) based on the modular, component forms that were intrinsic to industrial materials. The method, which had been tried for the first time in the construction of his garden house, quickly attracted notice for its great simplicity and economy: the entire structure was built in ten weeks, at a cost of just £10 per square metre (Pawley, 1984).

The modular system: from the component to the aggregate

The base module of Segal buildings is the plywood panel, the simplest of building materials. The measurement of a 60 cm + 5 cm⁴ allowance provides the unit of a square grid: every layout is designed around this. This is a long way from a system based on human measurements (as in Le Corbusier's 'modulor'), or on bespoke jointed modules purposely constructed for the building. Segal's system is based on materials and measurements that are readily available. Construction, therefore, becomes an assembly of ready-made components, optimising the number of cuts, and using frictional forces to maintain the different elements: by avoiding nails and screws, it is easy to reuse modular panels.

Segal's ambition was to make robust but simple buildings: modularity leads to great economy and facilitates easy maintenance by those who inhabit the space. His houses have a high level of flexibility, as they can easily be extended or reconfigured: he would relate with some pride that some of his clients removed walls for a party, and then put them back once it was over (McKean, 1989).

The simplification of the building system is reflected in Segal's economical planning scheme: 20/30 A4 sheets (easy to photocopy), drafted by hand, with exhaustive details and a bill of quantities. These were sufficient to obtain the necessary permissions and guide the building work (Kainrath, 1981). The largest development was thirteen self-built units in Lewisham (Fig. 2-5), within a social housing programme managed by the anarchist Brian Richardson, Deputy Chief Architect of Lewisham Council, whom Segal met through a shared friendship with Colin Ward. Segal's collaborator for this project was Jon Broome (1986), who supported him in the practical application of his system; the project had to overcome various bureaucratic obstacles before it got underway in 1979. The alternative housing development stands on two streets named in memory of the architect, who died before the building was completed: Walters Way and Segal Close.

The houses are still maintained and well looked after by their residents, bearing witness to the fact that Segal's method has not been abandoned since its creator's death, but continues to be applied by ordinary citizens, architects, and enthusiastic followers. Segal's modular system is most certainly not the modularity of a pre-fabricated future (De Graaf, 2017), and light years away from the monotonous processes of industrial design: every building is unique, produced by a unique set

of different people, with hard work and scrupulous care.

The legacy of a vision: pupils and followers

Segal was not, however, simply a designer, for in the course of his career he taught and published in numerous papers and manuals (Blundell Jones, 1988). Most notable in his vast volume of writing is *Home and Environment* (Segal, 1948), a rich anthology of building typologies, layouts and technical details, as well as a series of pointed letters, reviews and critical articles such as those on the neo-purists (Segal, 1972) or relating to the postmodern recession (Segal, 1982).

Segal's unconventional system has inspired different initiatives right from the 1970s. In 1973 a group of students from the Western Australia Institute of Technology called Segal on the telephone to talk about building a structure in Perth,

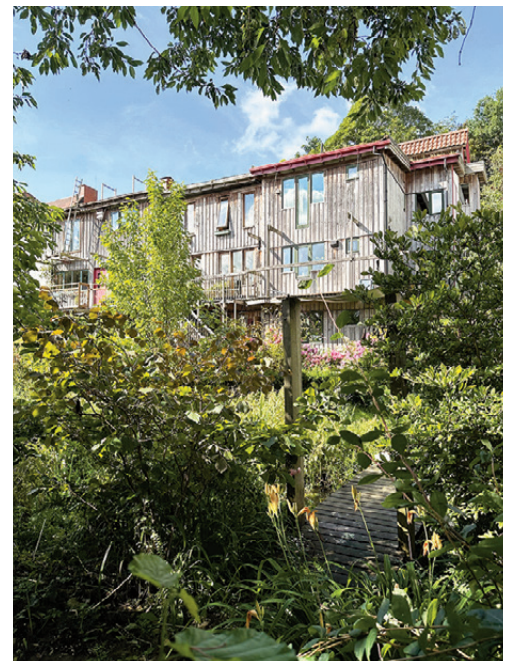


Fig. 8, 9 | Segal method house built by Jonathan Lindh and Harriet Walsh, Leeds (credits: the Author, 2023).



Fig. 10 | A wall of the Mass Bespoke construction system (source: massbespoke.com).

Fig. 11 | Wall block connectors are put in place into a WikiHouse wall (source: wikihouse.cc).

Fig. 12 | U-Built modules for the construction of Nest House (2021) in Herefordshire, designed by Studio Bark (source: u-build.org; credit: A. Billman).

as the subject of an undergraduate thesis. After a ninety-minute international call, the building work began (McKean, 1989). A further example is the Bauhäusle at the Stuttgart School (Awan, Schneider and Till, 2011), which began in 1981: the dormitories, built by the students under the guidance of Professors Peter Sulzer and Peter Hübner, were inspired by a workshop given by Walter Segal at the German School of Architecture in 1979.

Many of the pupils who met Walter Segal as a teacher or conference speaker were struck by his magnetic personality and shared his approach to design. This was true of architects Duncan Roberts and Mary Kelly (students at the School of Architecture in Hull) and of their house in Belford (Fig. 6, 7), Northumberland. This is a building created by (literally) dismantling and reassembling some of the original structures of a house with a medical clinic in Clifford, Yorkshire; even at the present time, its designers are planning a new extension. In 1993 Jonathan Lindh and his wife Harriet Walsh, together with Heimir Salt and Nick Arrow, designed and built three connected houses on a plot in Leeds (Fig. 8, 9), using the Segal method.

There are then many examples of alternative building projects, or the free initiatives which nurture a 'mat urbanism' (Allen, 2001) that can upscale the component part to the aggregate development: as Harriet Walsh⁵ notes, a Segal house is as easily recognisable as an Edwardian house. Colin Ward maintained that the Segal method enabled the architect to become an intermediary who not only can unleash energy and generate sustainable ways of working, but also build on marginal or particularly steep plots of land that have low economic value.⁶

Towards a 'making' architecture | Walter Segal's work raises many research questions which resonate with contemporary design practice. The refinement of his methods can be seen in innovative bioclimatic strategies and in the perfecting of artefacts that are energy efficient: both these issues are implicit in his approach. Also, much of his teaching focuses on a desire for transparent constructions, with visible bolted plates and joints, as well as on completely new inventions such as, for example, 'floodable roofs'.

The unique trajectory of Segal's practice will now be considered in the context of some recent case studies, selected from design projects completed in the last fifteen years, which can be exclusively compared with the building of architectural works, prototypes, or large-scale models. The selection is not bound by geographical location: most are based in northern Europe and Japan, due to the special affinity of Segal's work with traditional building techniques in these locations, where dry constructions are widespread. Each of these case studies is characterised by its own unique trajectory towards a 'making' architecture and the digital fabrication of modular design, 'ready-made', 'transparent', 'frugal', self-built edifices for domestic use that are easily disassembled, and which optimise their structural components.

Digital fabrication is one of the aspects that most notably chimes with the simplification that Segal introduced to the building process: it unites complexity of design with simple building processes (Pone, 2022) and is often linked to the potential for self-build that puts the realisation of the

design directly into the hands of the architect, or of other people. Building systems that are now commercially available, such as Mass Bespoke, WikiHouse or U-Built, are based on production kits that can be ordered as separate units to be assembled directly on-site.

Mass Bespoke⁷ (Fig. 10) is a method invented by Baumann Lyons Architects in 2011 in answer to the need for small entities that could be built on a budget that was insufficient for traditional construction. WikiHouse⁸ (Fig. 11), on the other hand, is an open-source system, founded in 2011 by Alastair Parvin and Nick Ierodiaconou; the not-for-profit society Open System Lab, which manages the project, defines its mission as follows: «[...] to collaboratively develop new ways of doing, and get them into the hands of every citizen, community, business and government». Alastair Parvin himself defines WikiHouse as a Segal method 2.0: «If Segal were here today, I believe he would be very interested in systems like WikiHouse. We can combine Segal's principles and the tools we have today to carry on his mission and take the future further» (Grahame and McKean, 2021, p. 191).

U-Built⁹ (Fig. 12) is a similar system, designed to simplify the building process and enable people to actively participate in it. Designed by Studio Bark and based on plywood boxes joined together with anchor points, the system fits into the Segal mode of design, in that it facilitates disassembly and the re-use of entire elements (Graham and McKean, 2021), even though it also requires the initial groundwork of shaping the panels. Lastly, we should look at the research that appeared in the article Intelligent Building Boxes in the Architects Journal as far back as 1985: John Frazer, a researcher in Computer-Aided Design at the University of Ulster, described the software that was capable of translating the Segal method into a virtual model: the software responded to the manipulation of a physical scale model, generating in real time the data required for the building phase. So, in this case, there was already a system of intelligent components that with the aid of a computer could create a DIY design; such aid, according to the journal's editorial, would expand the opportunities for dialogue between architect and client.

A further line of the research pioneered by Segal is evident in the establishment of modular construction, using ready-made, pre-existing materials, elements and /or components that are put together to create a space. An example of this is the series of design experiments by the Japanese architect Kengo Kuma, who, in some of his prototypes, draws on pre-existing components to create new temporary dwellings or shelters: Umbrella House¹⁰, 2008 (Fig. 13) and Hojo-An¹¹, 2013 (Fig. 14). The former was a prototype for a waterproof shelter, created by zipping together fifteen umbrellas, without their handles; the latter case was a small hut, made from assembling small batons of red cedar fitted with magnets, and a translucent sheet of ETFE.

While these prototypes differ from those of Segal, in that they are not intended for everyday use, they share the same desire to solve difficult issues in the simplest possible way. As micro architectures they also provide didactic experiments, such as the Tea Gloo that was created in a joint workshop run by the Politecnico di Milano and Tokyo University, co-ordinated by Kengo Ku-

ma and Jun Sato: in this case, the modularity of the Japanese Ken constituted the basis of a building made of individual baskets, joined together with cable ties and supports (Imperadori and Brunone, 2018), designed to be easily assembled and dismantled as soon as it was not needed any more. These examples demonstrate a close relationship between making and teaching, where the use of modules becomes a vehicle for a complex concept that is easy to build on-site.

In the work of Peter Grundmann the role of the Architect, as the main protagonist of the different stages of the building process, becomes almost that of an artisan – making use of industrial materials and creating the different components of a self-built building by hand. The Neiling House II¹² (Fig. 15, 16), created in 2015 at Löwenberger, north of Berlin, is a low-cost home, simple to build and dismantle, and therefore to reuse. This project also represents a clear example of Design for Reuse or Design for Disassembly, where the design of a building takes account of its future dismantling and reassembling.

Reminiscent of the lightweight buildings of the Segal system, the house rises 1.3 m above ground, enclosing a pre-existing haystack with brickwork partitions, while the vertical closures are entirely of glass. As well as the house, Peter Grundmann and Thomas Phol designed and built the furnishings for the kitchen, bathrooms, and bedroom in plywood; all artefacts and furniture were designed with the same potential to be dismantled and reassembled at any time.

An appreciation of frugality is another constant motif in Segal's work, as already observed by Colin Ward when he noted that frugal, living architecture is intertwined with the playful, modest stories of ordinary life (Borella, 2016). Ordinary life, the quality of small buildings, and the valuing of little things become key aspects of the profession of the architect; indeed, during an interview with Charlotte Ellis (1982, p. 34) Segal exclaimed: «I am terribly glad to have had a large number of small commissions».

This approach is also reflected in the work of Giacomo Borella, co-founder of the Studio Albori in Milan, and particularly in the Casa at Laveno¹³ on Lake Maggiore, built in timber and straw, with second-hand fittings (Fig. 17). In this example, reclaimed elements become the dimensional modules that guide the design, so that pre-existing objects can be absorbed organically into the building, simultaneously conserving their intrinsic energy to give vital support to the construction work and bestowing them with dignity and meaning.

Another aspect of research that Segal pursued was that of structural economy, or the use of the lowest possible quantity of material. This applied as much to the layout of a structure as to the calculations for a section. This pursuit of 'the most appropriate technologies' (McKean, 1986) occurs in some interesting contemporary work, such as The Weekend House built in 2016 in Viggso¹⁴ (Fig. 18, 19), by the Swedish duo Arrhov Frick (Ruby and Ruby, 2020): in their paper *Be Reasonable – Standard Wood Elements Sized to Do What They Need to Do*, they describe their desire to achieve a structural economy.

The distance of the site from the coastline, and the relative elevation of 15m made it necessary to optimise the weight of building materials

to be transported to the site: «The goal was to create sustainability by using only the amount of material that was strictly necessary, showing how simple, standard components can become architecture» (Ruby and Ruby, 2020, p. 372); the whole structure is composed of laminated beams just 11.5 cm thick. This feature is also present in other works by the Studio, for example, a private house built in Ingarö¹⁵ in 2014 (Fig. 20) and a design for a building in Norrtälje¹⁶ in 2018.

The concept of 'transparent buildings' is also present in the design research projects of the Danish studio Pihlmann Architects and particularly in the Home Minus 12.5 mm¹⁷ (Fig. 21, 22). This is an experimental design, realised in three 1:6 scale models, where the finishing layers have been removed but the buildings are furnished with furniture and ordinary objects such as plastic bags, clothes, and plants: the removal of the finishing layer – a generic 12.5 mm plasterboard panel – exposes all the construction components contained within a domestic environment.

The experimental design was published in *Connectedness – An Incomplete Encyclopedia of the Anthropocene* (Krogh, 2021), and exhibited in the Danish Pavilion at the Venice Biennale 2021, though limited to the production of some scale models. It implicitly reveals some of the issues raised by Segal the recognisability of elements of construction, and their visibility, the intrinsic incompleteness of a domestic setting, or the didactic nature of the act of construction. All these are elements which give the end-user an awareness of how 'things are made' and how they can be repaired.

Concluding reflections and new scenarios for a pragmatic architecture and aesthetic

The unconventional work of Walter Segal is, therefore, a resounding anticipation of traceable movements in the diverse production and experimentation of contemporary design. Although there is no direct link between the different case studies, each of them springs from the pragmatism of 'making' and from the search for a natural, physical realisation of a design which almost always has the effect of creatively overcoming bureaucratic obstacles. These experiments are linked by a series of underground roots, evident in the common practice of design for sustainability, to be achieved with the most appropriate and simple means that do not require grandiose systems or complicated tools, but which are based on common sense and an innate physical sensitivity.

Walter Segal's experience thus emerges as a prototype of conscious design that was ahead of its time, which achieved sustainable development in environmental, economic and social terms, and therefore also in areas such as reducing soil depletion, reducing waste, access, and the optimisation of life cycles and the use of materials, elements and components that are readily repaired (Baratta, 2021). His effectiveness in these areas is particularly significant, in that his proposed process of continuous assembly and disassembly of building materials wrought a paradigm change towards circular design, developing systems of 'cradle to cradle' that replaced the linear systems of 'from the cradle to the grave' (Sposito and Scalisi, 2020).

Moreover, his focus on people's everyday experience and his predilection for small projects

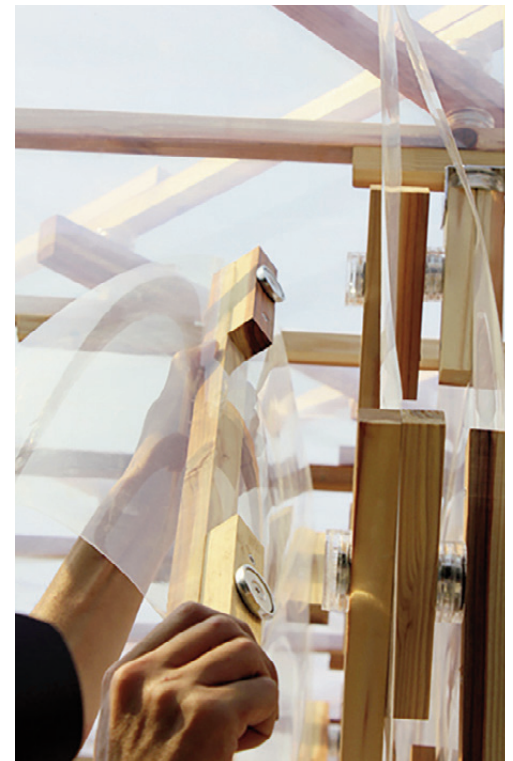


Fig. 13 | Umbrella House (2008) in Milan, designed by Kengo Kuma (source: inhabitat.com).

Fig. 14 | Hojo-an after 800 years (2012) in Kyoto, designed by Kengo Kuma (source: spoon-tamago.com).

Fig. 15, 16 | Neiling II House (2015) in Berlin, designed by Peter Grundmann (source: petergrundmann.com).



show us that change begins with small things, rather than with large-scale systems or flamboyant narratives. So, his work actively reflects a paradigm shift, a move towards a bottom-up strategy of enlarging the opportunities and responsibilities of the individual.

Today the main barriers to developments of this nature are legislative and bureaucratic, either cultural or else identifiable in the stringent safety regulations imposed by an open building site, or by those dictated by certification of compliance. The greatest limitation to the diffusion of this model is the vast and disparate legislative framework which governs the complex world of construction. Even in the 1970s, the atypical nature of Segal's buildings gave rise to complicated procedures to obtain the necessary permissions. The current legal framework has now evolved to be ever more stringent and varied across the whole international scene. But Segal's work is a reminder of the necessity to work at the edges of the legislation, to tackle regulations with creativity, not dogma, in a critical activism that prepares the ground to update those regulations. There are many recent examples of this tendency, starting with the annual Creative Bureaucracy Festival¹⁸ in Berlin.

A second cultural barrier about the initial misgivings about the feasibility of self-building can be implicitly overcome through the participation and inclusion inherent in the Segal method, precisely at the point when the work gets underway. Segal's building sites were open, convivial spaces, where whole families, including women and children, joined in. On one hand, this dynamic made his architectural works particularly appealing, but conversely it introduced further limitations relating to safety, correct installation and certification of work, which created problems in its application.

Still, the Segal method retains its importance in future developments relating to the teaching value of architectural design, inherent in his view of the profession of the architect, as demonstrated in the case studies above: his example can be a guide for designers considering issues of sustainability, now impossible to avoid, using critical and lateral thinking, avoiding narrow regulatory values and working actively to achieve practical results in construction. It is no coincidence that a prototype Segal house was assembled in the CAT¹⁹ (Centre for Alternative Technologies) in Wales. The centre's motto is 'practical solutions for our changing planet'.

To summarise, Segal's architecture is a metamorphosis of lightweight materials, that can be installed and re-installed with ease; a practice which defines not only a way of 'making' things, but a true aesthetic that finds rich parallels in many contemporary works. The pragmatic aesthetic (Shustermann, 2010) visible in Segal's works is bound to the centrality of the form in space, on an interpretation of building as a natural human activity, and on a substantial economy of resources. Direct personal and physical experience lies at the root of all reflections on architecture, writes Giacomo Borella (2016), in his introduction to the writings of Colin Ward, in which the outsider Walter Segal also makes an appearance. The same subject is raised by Anne Lacaton (2020, p. 58): «Make do with the existing, with people, nature, climate, the economy, in order to reinvent, to do more with less». Make do, then, with what we have, but without ever stopping to pose the question: why do we do what we do?²⁰



Fig. 20 | Private House (2015) in Ingarö, designed by Arrhov Frick (source: afasiaarchzine.com; credit: M. Olsson).

Figgs. 21, 22 | Home minus 12.5 mm (2020), model by Pihlmann Architects (source: pihlmann.dk; credits: H. Berndtson).

Left

Fig. 17 | House in Laveno (2020), designed by Albori Studio (credit: L. Bosco).

Figgs. 18, 19 | Private House (2016) in Viggssö, designed by Arrhov Frick (source: subtilitas.site; credits: M. Olsson).

Notes

1) Florian Beigel and Philippe Cristou, founders of the Architecture Research Unit at the Polytechnic of North London (now London Metropolitan University), organised and catalogued Segal's archive after his death, and curated the 1988 exhibition. John Segal conserves the archive.

2) Alice Grahame (2018) knew nothing about Segal before she bought one of his self-built houses in Lewisham as her family home. It was from this time that she began to research the architect and his legacy.

3) Arthur Segal, Walter's father, collaborated with the Novembergruppe and the Dada group in Berlin, and knew some of the most noted architects of the time. Some of them wrote letters of introduction for the young Segal.

4) Some of Segal's pupils would joke about doors that were just 60cm wide, and tiny 60x60cm shower cubicles. The construction module of 2 feet + 2 thumbs was, however, rigorously adhered to, even at the cost of sacrificing some ergonomic features.

5) The phrase was used in a conversation with Harriet Walsh, with the author, in the house that she builds with her husband in Leeds.

6) One of the main issues that Walter Segal has always fought against is the cost of land, which is too high to allow building initiatives without incurring.

7) For further information, see the webpage: massspoke.com/about-us.html#ABOUTUS [Accessed 8 October 2023].

8) For further information, see the webpage: opensystems-lab.io/; wikihouse.cc/ [Accessed 8 October 2023].

9) For further information, see the webpage: u-build.org [Accessed 8 October 2023].

10) For further information, see the webpage: kkaa.co.jp/en/project/casa-umbrella/ [Accessed 8 October 2023].

11) For further information, see the webpage: kkaa.co.jp/en/project/hojo-an-after-800-years/ [Accessed 8 October 2023].

12) For further information, see the webpage: petergrundmann.com/haus-neiling-ii/ [Accessed 8 October 2023].

13) For further information, see Tranfa (2023) and webpage: albori.it/con-molta-calma-very-calmly/ [Accessed 8 October 2023].

14) For further information, see the webpage: arrhovfrick.se/viggso [Accessed 8 October 2023].

15) For further information, see the webpage: arrhovfrick.se/ingaro [Accessed 8 October 2023].

16) For further information, see the webpage: arrhovfrick.se/grisslehamn [Accessed 8 October 2023].

17) For further information, see the webpage: pihlmann.dk/home-minus-12-5-mm [Accessed 8 October 2023].

18) For further information, see the webpage: creative-bureaucracy.org [Accessed 22 October 2023].

19) For further information, see the webpage: cat.org.uk [Accessed 22 October 2023].

20) This question was posed by John McKean (1998) in an article on the didactic value of Segal's method; in this context, we can return to the Socratic dialogue of Eupalinos and Phaedrus (Valéry, 2011) and ask a second question: is building the same as building oneself?

References

Allen, A. (2001), "Mat Urbanism – The Thick 2-D", in Sarkis, H. (ed.), *Le Corbusier's Venice Hospital and the Mat Building Revival*, Prestel Verlag, Monaco, pp. 118-126. [Online] Available at: issuu.com/alessandrogabbianelli/docs/stanallen_mat-urbanism [Accessed 8 October 2023].

Awan, N., Schneider, T. and Till, J. (2011), *Spatial Agency – Other Ways of Doing Architecture*, Routledge, London.

Balducci, B. and Camilli, F. (2022), "Progettare l'ecologia – Il vegetale come paradigma possibile di un'architettura sostenibile e resiliente | Designing ecology – The organic as a possible paradigm of a sustainable and resilient architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 84-93. [Online] Avail-

able at: doi.org/10.19229/2464-9309/1172022 [Accessed 8 October 2023].

Baratta, A. F. L. (2021), "Dalle politiche per la circolarità delle risorse alla strategia zero rifiuti | From resource circularity policies to the zero-waste strategy", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 9, pp. 32-41. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/932021 [Accessed 8 October 2023].

Beigel, F. (1988), "Pragmatic approach", in *The Architects' Journal*, 4 May 1988, pp. 55-69.

Blundell Jones, P. (1988), "The path to Lewisham", in *The Architects' Journal*, 4 May 1988, pp. 42-54.

Borella, G. (2016), "Frammenti di un'Arcadia possibile", in Ward, C. (ed.), *Architettura del dissenso – Forme e pratiche alternative dello spazio urbano*, Elèuthera, Milano, pp. 7-18.

Borgonovo, V. and Franceschini, S. (2018), "Global tools – Gli strumenti di una scuola possibile", in Borgonovo, V. and Franceschini, S. (ed.), *Global Tools – Quando l'educazione coinciderà con la vita*, Nero Edizioni, Roma, pp. 8-31.

Broome, J. (1986), "The Segal Method", in *The Architects' Journal*, 5 November 1986, pp. 31-68.

Broome, J. and Richardson, B. (1991), *The Self-built Book – How to Enjoy Designing and Building Your Own Home*, Green Books, Bideford.

De Graaf, R. (2017), *Four Walls and a Roof – The complex nature of a Simple Profession*, Harvard University Press, Cambridge London.

Ellis, C. (1982), "Segal's first half-century in practice", in *The Architects' Journal*, 7 April 1982, pp. 33-36.

Grahame, A. (2018), "Searching for Segal", in *A Magazine for RIBA Friends of Architecture*, vol. 8, pp. 46-51.

Grahame, A. and McKean, J. (2021), "Walter Segal – Self-built architect", in *Lund Humphries*, 30/06/2021. [Online] Available at lund Humphries.com/blogs/features/walter-segal-self-built-architect-in-conversation-with-alice-grahame-and-john-mckean [Accessed 8 October 2023].

Grahame, A. and Wilkhu, T. (2017), *Walter Way and Segal Close – The Architect Walter Segal and London's Self-Build Community – A look at two of London's most unusual streets*, Park Books, Zurich.

Ibañez, D., Guallart, V. and Salka, M. (2022), "La prototipizzazione pedagogica di edifici ecologici avanzati e biocittà presso il Valldaura Labs | On pedagogical prototyping of advanced ecological buildings and biocities at Valldaura Labs", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 136-149. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11122022 [Accessed 8 October 2023].

Imperadori, M. and Brunone, F. (2018), "Insegnare costruendo – Architettura temporanea tra ricerca e didattica | Teaching and building – Temporary Architecture between research and didactics", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 4, pp. 21-28. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/432018 [Accessed 8 October 2023].

Kainrath, W. (1981), "Walter Segal – Biografie eines Außenseiters – Oder Warum vernünftige bauen ein subversives Unternehmen ist", in Andritzky, A., Burckhardt, L. and Hoffmann, O. (eds), *Für eine andere Architektur – Natürlich bauen selbstbestimmt bauen und wohnen*, Fisher-Taschenbuch-Verlag, Frankfurt, pp. 98-107.

Krogh, M. (ed.) (2021), *Connectedness – An Incomplete Encyclopedia of the Anthropocene*, Standberg publisher, Copenhagen.

Lacaton, A. (2020), "Make do", in Ruby, I. and Ruby, A. (eds), *The Materials Book*, Ruby Press, Berlin, pp. 58-79.

McKean, J. (1998), "Epistemology – Or who is the Architect? A Fable", in *Les Cahiers de l'enseignement de l'architecture*, vol. 2, pp. 111-125. [Online] Available at: academia.edu/17783827/Epistemology_or_Who_is_the_Architect_A_Fable_Ideas_of_Walter_Segal_Paper_to_conference_Epistemological_Foundations_in_Architectural_Education_Published_in_Les_Cahiers_de_l'enseignement_de_l'architecture_No_2_p_111_125_Geneva_1998 [Accessed 8 October 2023].

McKean, J. (1989), *Learning from Segal – Walter Segal's Life, Work and Influence*, Birkhäuser, Basel.

McKean, J. (1986), "Semi preziosi di buon senso", in *Spazio e Società*, vol. 34, pp. 18-26.

Pawley, M. (1984), "Walter Segal's House", in *The Architects' Journal*, 20 June 1984, pp. 35-38.

Pone, S. (2022), "Maker – Il ritorno dei costruttori – Una possibile transizione digitale per l'Architettura | Maker – The return of the builders – A possible digital transition for Architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 14-23. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1212022 [Accessed 8 October 2023].

Ruby, I. and Ruby, A. (eds) (2020), *The Materials Book*, Ruby Press, Berlin.

Segal, W. (1982), "Postmodern recession", in *The Architects' Journal*, 17 February 1982, pp. 30-31.

Segal, W. (1972), "The neo purist school of architecture", in *Architectural Design*, June 1972, pp. 344-345.

Segal, W. (1948), *Home and Environment*, Leonard Hill, London.

Sposito, C. and Scalisi, F. (2020), "Ambiente costruito e sostenibilità – Materiali riciclati e Design for Disassembly tra ricerca e buone pratiche | Built environment and sustainability – Recycled materials and Design for Disassembly between research and good practices", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 8, pp. 106-117. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8102020 [Accessed 8 October 2023].

Shustermann, R. (2010), *Estetica Pragmatista*, Aesthetica, Palermo.

Tranfa, F. (2023), "Studio Albori – Casa si legno e paglia, Levano, Varese", in *Casabella*, vol. 942, pp. 2-9.

Valéry, P. (2011), *Eupalinos o l'Architetto*, Mimesis, Sesto San Giovanni (MI).

Wachsmann, K. (1995), *Building the wooden house – Technique and Design*, Birkhäuser Verlag, Basel.

Ward, C. (2016), *Architettura del dissenso – Forme e pratiche alternative dello spazio urbano*, Elèuthera, Milano.

ARTICLE INFO

Received	16 September 2023
Revised	19 October 2023
Accepted	30 October 2023
Published	31 December 2023

OLTRE IL CORPO

Ripensare il modulo per favorire l'inclusione sociale

BEYOND THE BODY

Rethinking the architectural module to promote social inclusion

Mickeal Milocco Borlini, Ambra Pecile, Christina Conti

ABSTRACT

Esplorare e analizzare il modulo è oggi un'operazione critica attraverso la quale raccontare variazione e variabilità, superando l'originario concetto derivante da una standardizzazione dell'essere umano ed evidenziando come invece la flessibilità e la diversità fisica di quest'ultimo condizionino la definizione di una modularità assoluta. In tal senso, il presente contributo esplora in maniera critica i limiti di applicabilità del modulo-misura, così come comunemente inteso, nei progetti di architettura per le persone e, nel dettaglio, nei processi di accessibilità ambientale e inclusione. Se il concetto di misura è sempre stato legato a quello di persona, la presa di coscienza della diversità umana richiede oggi una rivisitazione del concetto di 'modulo' in chiave non solo fisica ma anche e soprattutto percettiva e delle neurodiversità tipiche e atipiche.

The architectural module has long been associated with the concept of measurement, where standardisation of the human body is used to define absolute modularity. With the awareness of human diversity, this narrow view of the module's applicability is problematic, particularly in processes of environmental accessibility and inclusion. This paper critically explores the limits of the traditional measurement module, rethinking the concept of modularity to account for physical and perceptive diversity. By doing so, we aim to promote social inclusion and universal design in architectural projects for people. The paper concludes that the evolution of the concepts of the module and the human being requires a revision of their very meanings, calling for a more inclusive approach to design and planning in our contemporary world.

KEYWORDS

accessibilità ambientale, variabilità delle persone, progettazione universale, modulo, percezione

environmental accessibility, people variability, universal design, module, perception

Mickeal Milocco Borlini, Architect and PhD, is a Lecturer in Interior Design at the Cardiff School of Art and Design at Cardiff Metropolitan University (UK) and researches innovative methodologies and solutions on universal design. Email: miloccoborlini@cardiffmet.ac.uk

Ambra Pecile is a PhD Candidate in the Doctoral School in Civil-Environmental Engineering and Architecture at the University of Trieste (Italy) with a research grant financed by the Friuli-Venezia Giulia Region on topics related to the revitalisation of industrial landscapes. Pecile worked as a Research Fellow at the University of Udine on regenerating urban and peri-urban environments. E-mail: ambra.pecile@uniud.it

Christina Conti is an Associate Professor in Architectural Technology at the DPIA Department of the University of Udine (Italy). She carries out research in the field of technological design with an awareness of the innovation of materials, products and techniques and inclusive design in sustainable contexts. Conti is responsible for the 'dalit' Laboratory on environmental accessibility. E-mail: christina.conti@uniud.it



L'elemento modulare, comunemente inteso quale 'modulo' e dunque matrice metrica, rimanda al concetto di misura, che in architettura è legata all'immagine della scala dell'individuo, del corpo, overosia il mezzo attraverso il quale la persona si confronta con la realtà esterna definendo i concetti di grandezza e proporzione: il pollice, il piede, il passo sono, di fatto, le prime forme di misura introdotte. Sin dall'antichità, il modulo e la misurazione precisa definivano un 'codice' che si esprimeva attraverso un'unità definita e tradotta in misura universale a partire dall'essere umano. Vi era l'idea, dunque, che il progetto di architettura dovesse essere ricondotto all'essere umano, che a sua volta doveva essere ridotto a delle misure standard, così da poter creare degli ambienti 'a misura d'uomo': una condizione che si riteneva necessaria per la configurazione dello spazio stesso.

In origine, dunque, il concetto di 'modulo' richiamava, da un lato alla possibilità di un ordine, di un'idea di perfezione a cui l'uomo deve aspirare, dall'altro a una standardizzazione del corpo umano stesso, dotato di proporzioni precise e assolute attraverso le quali poter raggiungere tale perfezione (Albiro, 1999). Ne è chiaro esempio l'Uomo Vitruviano, uno studio di proporzioni umane simbolo della perfezione classica del corpo e della mente: la misura diventa simbolo dell'auto-rappresentazione dell'uomo (Figg. 1, 2).

Oggi parlare di corpo umano ideale è diventato pressoché impossibile in quanto trattati di un costruito sociale e politico che si adatta al proprio tempo; analogamente, alla luce del contesto scientifico, politico e culturale attuale, il concetto stesso di 'uomo' (che accompagna da sempre quello di 'modulo') risulta essere oggi figlio di un retaggio passato. L'assunzione del termine 'persona' come sinonimo di 'uomo' si fa testimone di una lunga evoluzione filosofica e culturale che supera i meri riferimenti biologici e medici nell'approccio alle discipline e alle tematiche che pongono al centro dei loro studi l'essere umano, delineandone un significato antropologicamente universale. Il termine 'persona', infatti, trascende le caratteristiche fisiche, di età e di genere, riferendosi, in senso lato, a tutti gli individui (giovani, adulti e anziani), singoli e/o in relazione tra di loro, che vivono gli spazi della quotidianità con necessità diverse per condizione evolutiva d'età, per abilità fisiche, per formazione culturale ed esperienza (Baratta, Conti and Tatano, 2019).

Sulla base di tali premesse appare evidente come l'evoluzione dei concetti di 'modulo', da un lato, e di 'uomo', dall'altro, richieda oggi una revisione dei loro stessi significati. Come ricordano Lorenzo-Palomera, Fuentes-Pérez e Aranda-Jiménez (2022), ad esempio, il Modulor di Le Corbusier (1960) è una misura immaginata, che non è in alcun modo rappresentativa della variabilità delle persone e, per tali ragioni, può essere applicata solo a quella percentuale di popolazione che si pone entro la statistica disegnata da Le Corbusier: 'il Modulor non è globalmente antropometrico' (Lorenzo-Palomera, Fuentes-Pérez and Aranda-Jiménez, 2022). Allo stesso modo nel Modulor non vi è alcun riferimento a generi diversi e a un approccio più inclusivo (per esempio, persone con disabilità), e si vince, al contrario, come esso sia calibrato esclusivamente sulla popolazione di genere maschile. Per tali ragioni l'impiego del Modulor (tra i tanti) per disegnare e progettare la con-

temporaneità, ricca di sfumature e diversità, risulta oggi quanto mai superato.

Il modulo, di fatto, che nasce come dispositivo di supporto alla progettazione di ambienti 'a misura d'uomo' deve oggi dialogare con un'idea contemporanea di misura, la quale viene spinta verso una sua relativizzazione, affiancando alla sua originaria matrice antropomorfa un significato legato all'agire dell'individuo che somma alla componente quantitativa anche quella relazionale, percettiva e cognitiva (Iwarsson and Ståhl, 2003). In questi termini, di rilievo risulta la Convenzione delle Nazioni Unite sui Diritti delle Persone con Disabilità – CRPD (UN, 2006), un documento che si pone l'obiettivo di ampliare l'inclusione sociale ponendo al centro del dibattito la persona con le sue diversità fisiche, sensoriali e cognitive per il rispetto dei diritti e la garanzia delle libertà, promuovendo il concetto di 'universalità' e, conseguentemente, quello di accessibilità.¹

Alla base di questi presupposti vi è il fondamento che alla progettazione spetta il compito di creare le condizioni per una corretta interazione tra la persona (e tra le persone) e l'ambiente (Lauria, 2017). Alcuni studi nel campo della prossemica² hanno infatti permesso di evidenziare come il corpo di una persona, in quanto elemento finito, possieda un territorio di riferimento che si estende oltre lo spazio che concretamente occupa e che gli permette di creare relazioni con gli altri corpi. Nel dettaglio, la prossemica individua quattro zone che identificano il significato della distanza corporale, overosia zona intima, personale, sociale e pubblica, le quali concorrono a esprimere la territorialità individuale variando a seconda della matrice culturale di riferimento.

Il corpo, dunque, vive nello spazio, ma la relazione stessa tra corpo e spazio incide sui sensi, attraverso una serie di informazioni che concernono l'organizzazione, la percezione e l'uso dello spazio stesso. Le teorie olistiche sviluppate dallo psichiatra americano George Engel (New York, 1913-Richester, 1999) nella definizione del Modello Biopsicosociale presuppongono un'unità inscindibile di mente e corpo, affermando e dimostrando le reciproche influenze che tra essi sussistono (Engel, 1977).

Appare evidente dunque che nel panorama sociale e scientifico attuale, l'idea di modulo, quale proiezione rigorosa della perfezione umana, viene messa in discussione sia dalla presa di coscienza delle diversità fisiche delle persone sia per l'evidente variabilità degli individui anche a livello psichico e cognitivo. Progettare spazi 'a misura d'uomo', o meglio 'a misura di persona' diventa, dunque, oggi una sfida che deve partire proprio dalla presa di coscienza della diversità degli individui: il comportamento personale condiziona l'idea di spazio e, conseguentemente, quella di misura, determinata da un limite fisico ma accompagnata da estensioni 'virtuali' e percettive del corpo stesso che variano da individuo a individuo. In tal senso, Baron-Cohen³ (2017) suggerisce di abbandonare la parola 'disturbo' (riferendosi alla constatazione della problematica di alcuni individui) e di utilizzare piuttosto quella di 'differenza / diversità', la quale non deve indicare qualcosa di diverso dalla norma, anomala, bensì deve essere intesa quale sinonimo di variabilità, varietà, neurodiversità.

Sulla base di tali premesse il contributo⁴, assumendo come fondamento la variabilità delle per-

sone, si pone in antitesi rispetto al canone tradizionale dell'uomo vitruviano e, conseguentemente, all'idea di standardizzazione delle componenti fisiche del corpo e percettive della persona per la definizione del modulo. Lo spazio di fatto è un tessuto di relazioni nascoste che vanno oltre le proporzioni progettate e, per tali ragioni, non si ritiene possibile pensare a una completa razionalizzazione dell'idea di misura e quindi di modulo. La dialettica tra idea di spazio e aspetti percettivi e prossemici conduce a un progetto di modularità relativa da attuare attraverso una lettura incrociata e trasversale delle diverse componenti che, nella progettazione degli spazi, concorrono a costituire costanti e differenze.

Assumendo come matrice la variabilità delle persone con i suoi aspetti non solamente funzionali e materiali ma anche sociali, percettivi ed etici, l'indagine giunge alla definizione di una nuova sintesi che è, però, mutabile e coerente con le esigenze della contemporaneità, promuovendo, in particolar modo, l'accessibilità e l'inclusione sociale, con necessario rimando al concetto di 'progettazione universale'⁵. A fronte dei risultati raggiunti da una successione di ricerche indirizzate alla comprensione delle relazioni persona-ambiente è emersa l'importanza di definire la modularità in relazione alle criticità rilevate. Tali considerazioni risultano essere il risultato di una lettura incrociata del contesto architettonico e scientifico di riferimento, da un lato, e del quadro interdisciplinare, socioculturale e politico dall'altro.

Il limite delle considerazioni di cui al presente saggio è individuabile all'interno del quadro esigenziale degli utenti in relazione al funzionamento degli spazi per una corretta accessibilità ambientale. Cogliendo l'occasione delle sperimentazioni compiute in contesti pubblici e privati sono state, infatti, rilevate le variabilità modulari con riferimento ai diversi possibili livelli di personalizzazione. Tale operazione ha permesso di individuare la necessaria flessibilità dell'approccio modulare in relazione alla tipologia di utenti e alle differenti destinazioni d'uso, riconoscendo l'importanza dell'adattabilità dimensionale in contesti tanto pubblici (spazi urbani, sistemi di mobilità, ambiti del terziario e del commercio, ecc.) con riferimento all'universalità delle soluzioni (Lauria, 2014), quanto privati dedicati quali istituti protetti e residenze, con la personalizzazione funzionale di quest'ultime. In tal senso di rilievo sono stati i risultati ottenuti nello specifico degli itinerari urbani (Fig. 3), la cui natura comporta un'attenta revisione esigenziale degli utenti e prestazionale dei contesti esistenti (Conti, Milocco and Pecile, 2021).

Tale approccio riconduce all'ambito disciplinare dell'accessibilità ambientale, il cui ampio quadro scientifico internazionale di riferimento, nello specifico delle ricerche sviluppate, ha fatto riferimento alle competenze proprie della Tecnologia dell'Architettura attraverso l'impiego di un approccio interdisciplinare e multiprofessionale in rete con i diversi istituti impegnati per una progettazione universale. Nello specifico della progettazione tecnologica, primario è stato il riferimento alla rete di competenze dei cluster della Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura (SITdA).

Discussione: originalità e obiettivi | Nell'ambito specifico dell'accessibilità ambientale e date le premesse di cui sopra, si ritiene oggi necessaria

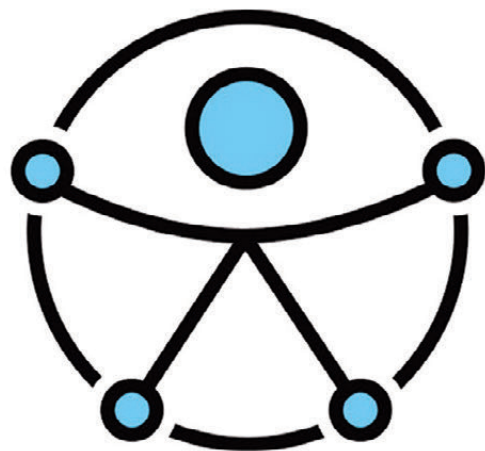
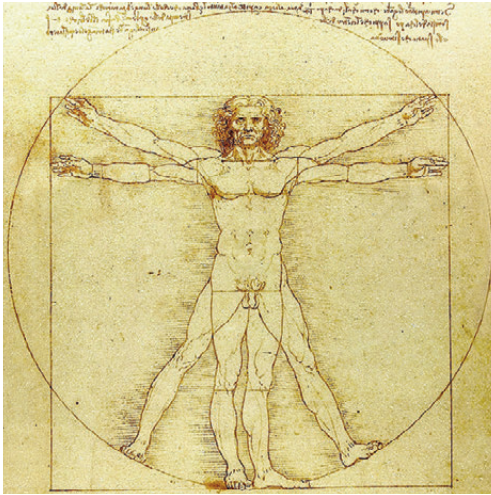


Fig. 1 | The Vitruvian Man by Leonardo da Vinci, ca. 1490. (source: commons.wikimedia.org).

Fig. 2 | Accessibility logo, UN (credit: Graphic Design Unit, United Nations Department of Public Information, New York).

una rivisitazione delle regole e dei paradigmi della composizione architettonica, della quale il modulo costituisce elemento fondante, in una chiave di progettazione universale (UN, 2006). La presa di coscienza della variabilità degli individui, di fatto, richiede oggi un'evoluzione delle regole e dei principi alla base della sistematicità del progetto di architettura.

Le argomentazioni di cui al presente saggio sono riconducibili alle attività svolte⁶ all'interno del Laboratorio 'dalt'⁷, una struttura del Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura dell'Università degli Studi di Udine per la didattica e la ricerca nell'ambito della progettazione accessibile e inclusiva in costante rapporto e confronto con le principali Istituzioni che a diverso titolo operano nel contesto regionale del Friuli-Venezia Giulia. In particolare modo, l'applicazione multiscale e sistemica dei paradigmi della progettazione ambientale, alla cui base risiede una comprensione consapevole delle relazioni persona-ambiente, ha visto la messa a punto di focus progettuali e di approfondimento in contesti definiti e confinati (quali, ad esempio, gli ascensori, gli attraversamenti pedonali, i percorsi ciclo-pedonali) o in specifici luoghi d'uso e attività (ad esempio, scuole o musei).

Allo studio della letteratura scientifica e ai risultati raggiunti da tali sperimentazioni e indagini concrete è stata affiancata un'analisi della norma-

tiva nazionale e internazionale di riferimento in materia di accessibilità e abbattimento delle barriere architettoniche.

L'originalità dei temi oggetto di approfondimento risiede nel continuo processo di attualizzazione dei riferimenti e delle linee di indirizzo, favorito sia dalla messa in rete dei risultati con altri Istituti di ricerca attivi sul territorio nazionale⁸ e internazionale sia dal costante confronto con i principali operatori che agiscono nel contesto regionale. In particolare modo di rilievo sono stati gli scambi di ricerca e di progetto con il Centro Regionale di Informazione sulle Barriere Architettoniche (CRIBA FVG)⁹ servizio tecnico della Consulta regionale delle Associazioni delle Persone Disabili e loro famiglie (CRAD), con il Comune di Udine e con la Regione Friuli-Venezia Giulia in collaborazione multidisciplinare con altri Atenei italiani.

Il risultato prodotto da tali esperienze risiede in un costante aggiornamento degli strumenti normativi e tecnico-progettuali a disposizione, anche e soprattutto per mezzo di una loro relativa validazione attraverso applicazioni concrete su specifici e definiti casi di studio. Rispetto al contesto italiano, di fatto, il riferimento al D.M. 236/1989¹⁰ fa emergere come l'apparato normativo, seppur prestazionale, sia oggi superato, dal momento che non completa il riferimento specifico alla persona.

La stessa conclusione si può ottenere analizzando le normative internazionali: l'Americans with Disabilities Act (ADA) del 1990, l'Accessibility for Ontarians with Disabilities Act (AODA) e l'Equality Act 2010 nel Regno Unito sono tutti documenti che posseggono un denominatore comune: apportare modifiche ragionevoli per accogliere le persone con disabilità in tutti gli aspetti della loro vita. Questi documenti non focalizzano la loro attenzione sulla persona dal punto di vista spaziale o modulare, ma contengono direttive dal punto di vista legale, di tutela e di diritto: nello specifico l'Equality Act britannico tutela tutte le minoranze. In aggiunta, queste normative sono integrate dal punto di vista delle costruzioni con il Documento 'M' che indica ai progettisti alcune linee guida per rendere gli edifici più accessibili. Da un punto di vista modulare e progettuale si può sostenere che i precedenti apparati normativi (US Congress, 1990; Parliament of the United Kingdom, 2016, 2010; HM Government, 2016; Legislative Assembly of Ontario, 2016) non esplicitano completamente le prescrizioni e i requisiti spaziali (di dettaglio e a piccola scala) per una progettazione universale (Steinfeld and Maisel, 2012).

Metodologia | L'indagine approfondisce il rapporto tra lo spazio e la variabilità delle persone alle diverse scale dell'architettura, da quella urbana a quella più definita e confinata di specifici ambienti e/o elementi edilizi, ponendolo in relazione con la normativa esistente. Parlare di modulo rimanda necessariamente alla definizione del profilo della figura dell'individuo di riferimento (utente) e, pertanto, del portatore di interesse, sulla base del quale si avviano i processi di standardizzazione che sottendono alla messa a punto della normativa di riferimento. Le sperimentazioni applicate, che all'analisi e allo studio della letteratura scientifica hanno affiancato attività di partecipazione diretta con i cittadini e gli utenti, hanno permesso di rilevare come l'esperienza personale sia quanto mai soggettiva e variabile.

Esemplificativa alla scala urbana risulta essere l'applicazione normata (in itinere) che ha visto dialogare l'Università di Udine e il Comune di Udine per uno studio propedeutico alla redazione dei PEBA – Piano per l'Eliminazione delle Barriere Architettoniche (Figg. 4-7) nel momento in cui la Direzione centrale Infrastrutture e Territorio della Regione FVG ha deciso di investire strumentalmente per l'incentivazione degli stessi impegnandosi con gli Atenei di Trieste e di Udine per la messa a punto di un sistema di monitoraggio delle criticità ambientali.

L'impegno di ricerca negli anni, affiancato da molteplici sessioni di partecipazione con i portatori di interesse (Figg. 8-11), è riconducibile a una organizzata conoscenza delle criticità ambientali nei diversi possibili contesti pubblici e privati, spazi di lavoro, ambienti domestici, ambienti residenziali assistiti, ambienti urbani, ecc., consentendo una rilettura attualizzata della normativa che regola la progettazione degli spazi pubblici.

Elemento fondante del processo di analisi è stato rilevato nella comprensione di come mutano gli elementi relazionali tra utente e ambiente a seconda di quanto uno spazio sia noto e familiare, di quanto le azioni compiute in esso siano ricorrenti (considerando modi e tempi di azione), se ci siano elementi effettivi di pericolo o se trattasi di un ambiente dedicato e protesizzato e infine di quanto sia frequentato e come siano controllate le componenti fisicotecniche di illuminazione, acustiche e termiche (Figg. 12, 13). Trattasi di questioni, quest'ultime, che permettono di identificare le specifiche interazioni possibili tra i bisogni, le esigenze e i desideri che l'utente può attivare all'interno di uno spazio auto-determinato, non aprioristico, ossia scelto in maniera soggettiva e personale (Conti, Milocco Borlini and Tubaro, 2020).

Le stesse considerazioni si possono trasferire a un dispositivo modulare per eccellenza: l'ascensore. Le precedenti ricerche hanno investigato l'elemento verticale di trasporto con attenzione all'accessibilità, alla sicurezza e agli standard di progettazione. Questi ultimi si esemplificano nell'applicazione delle normative e direttive europee e internazionali (ENI – ISO)¹¹, le quali permettono, dal punto di vista tecnologico, di definire le dimensioni spaziali del 'guscio' ascensore (Conti, Milocco and Tubaro, 2020; Figg. 14-16). Tra le più interessanti troviamo la EN 17210, che definisce dei requisiti minimi per limitare la 'discriminazione spaziale' seguendo i principi dello Universal Design: sinteticamente, l'ascensore come modulo deve prevedere la variabilità della persona in maniera ancora più precisa e inclusiva di spazi generalmente più ampi (Giacomello et alii, 2021).

Conclusioni e possibili implicazioni future | Dalle premesse teoriche che hanno fatto seguito ai risultati applicati sui casi di studio reali si evince l'importanza di assumere un metodo di lettura olistico, superando le standardizzazioni così da configurare un 'modulo-utente' in grado di consentire a individui di diverse capacità ed esigenze di interagire con l'ambiente costruito. La tesi sostenuta propone una rilettura critica del concetto di 'modulo' dove l'idea di misura viene messa in crisi in quanto non più fisicamente e percettivamente universale; tale revisione risulta essere solo concettuale, in quanto il modulo continua a mantenersi quale essenza del progetto di architettura nella

sua variabilità. Le argomentazioni esposte, infatti, sembrano condurre verso una nuova flessibilità dei parametri modulari secondo un modello biopsicosociale, così come definito dal ICF, Classificazione Internazionale del Funzionamento, della Disabilità e della Salute.¹²

Calando tali considerazioni nel contesto italiano di riferimento traspare come il tema sia tutt'oggi aperto, in continua evoluzione e bisognoso ancora di un adeguamento / aggiornamento culturale facendo dialogare sinergicamente i diversi specialismi che entrano in scena quando si fa riferimento al progetto per la persona; le stesse conclusioni sono applicabili anche alle esperienze internazionali citate in precedenza.

Seppur più avanzate sotto alcuni aspetti prescrittivi (si veda il documento 'M' britannico), vi è indubbiamente spazio per eventuali integrazioni e per possibili sviluppi futuri che possano prevedere una universalizzazione più inclusiva, basata su una modularità variabile a seconda dell'utente ultimo. Assumendo come matrice la variabilità umana con i suoi aspetti non solamente funzionali e materiali, ma anche sociali, percettivi ed etici, l'indagine giunge alla definizione di una nuova sintesi che è a sua volta mutabile in coerenza con le esigenze di una contemporaneità in evoluzione.

The modular element, a 'module' or metric matrix, is a concept in architecture and the built environment linked to measurement. In architecture, measurement is associated with the scale of the individual and their body, which defines proportions and how they interact with space. The inch, foot, and step are some of the earliest forms of measurement introduced to communicate this theory. Since ancient times, the module and precise measurement defined a 'code', expressed through a specific unit translated into universal measurement starting from the human figure. The architectural project can be traced back to the 'dimensions' of the body, which in turn had to be reduced to standard measurements to create 'human scale' environments, a condition considered necessary for the configuration of space itself.

Originally, the concept of 'module' recalls first the possibility of order, of an idea of perfection to which man must aspire, while it then refers to a standardisation of the human body itself, equipped with precise and absolute proportions through which such perfection can be achieved (Albiero, 1999). A clear example is the Vitruvian Man, a study of human proportions symbolising the classical perfection of body and mind: measurement becomes a symbol of man's self-representation (Fig. 1, 2). Nowadays, discussing the ideal human body has become almost impossible as it is a social and political construct that adapts to its time. Similarly, in light of the current scientific, political, and cultural context, the concept of 'man' (which has always accompanied that of 'module') appears today as the son of a past legacy. The assumption of the term 'person' as a synonym of 'man' bears witness to a long philosophical and cultural evolution beyond mere biological and medical references in the approach to the disciplines and themes that place where you study the human being, outlining an anthropologically universal mean-

ing. The term 'person' transcends characteristics of age, physical body, and gender. Instead, it broadly includes all individuals with different needs based on age, physical abilities, cultural training and experience (Baratta, Conti and Tatano, 2019).

Based on these premises, it is clear that the evolution of the concepts of 'module', on the one hand, and 'man', on the other, requires a revision of their very meanings. As Lorenzo-Palomera, Fuentes-Pérez and Aranda-Jiménez (2022) recall, Le Corbusier's Modulor (1960) is an imagined measure, which is in no way representative of the variability of people and, for these reasons, it can only be applied to that percentage of the population that falls within the statistics designed by Le Corbusier: «[...] the Modulor is not globally anthropometric» (cit. in Lorenzo-Palomera, Fuentes-Pérez and Aranda-Jiménez, 2022, p. 118). Besides, in the Modulor, there is no reference to different genders and a more inclusive approach (i.e., people with disabilities); unmistakably, it is calibrated exclusively on the male population. For these reasons, using the Modulor to design and plan the contemporary world, rich in nuances and diversity, is now more outdated than ever.

The module was initially developed as a tool for designing 'human scale' environments. However, it needs to be redefined in a contemporary context, considering a more comprehensive understanding of measurement beyond the physical dimensions of the human body. This new idea of measurement is pushed towards relativisation, meaning that it needs to be linked to consider the holistic needs of a person, including the relational, perceptive, and cognitive aspects. The module will add a new dimension to its original anthropomorphic matrix, ensuring that architectural projects are

more inclusive and accessible to people with diverse physical, perceptive, and cognitive abilities (Iwarsson and Ståhl, 2003). In these terms, the United Nations Convention on the Rights of Persons with Disabilities – CRPD (UN, 2006) aims to promote social inclusion by placing the person, with their diversity and individual needs, at the centre of the debate surrounding physical, sensorial, and cognitive accessibility. This approach aspires to respect the rights and guarantee the freedoms of all individuals, promoting the concept of universality and, thus, accessibility.¹

Some studies in proxemics² have made it possible to emphasise that a person's body, as a finite element, has a territory of reference that extends beyond the space it occupies and allows it to create relationships with other bodies. In detail, proxemics identifies four zones that determine the meaning of bodily distance: the intimate zone, the personal zone, the social zone and the public zone, which contribute to expressing variable individual territoriality depending on the cultural matrix of reference.

The body, therefore, lives in space. Regardless, the relationship between body and space affects the senses through information concerning the organisation, perception and use of the space itself (Lauria, 2017). The holistic theories developed by the American psychiatrist George Engel (New York, 1913-Richester, 1999) in the definition of the Biopsychosocial Model presuppose an inseparable unity of mind and body, affirming and demonstrating the mutual influences that exist between body and space (Engel, 1977).

Consequently, it appears evident that in the current social and scientific panorama, the idea of the module as a rigorous projection of human perfec-

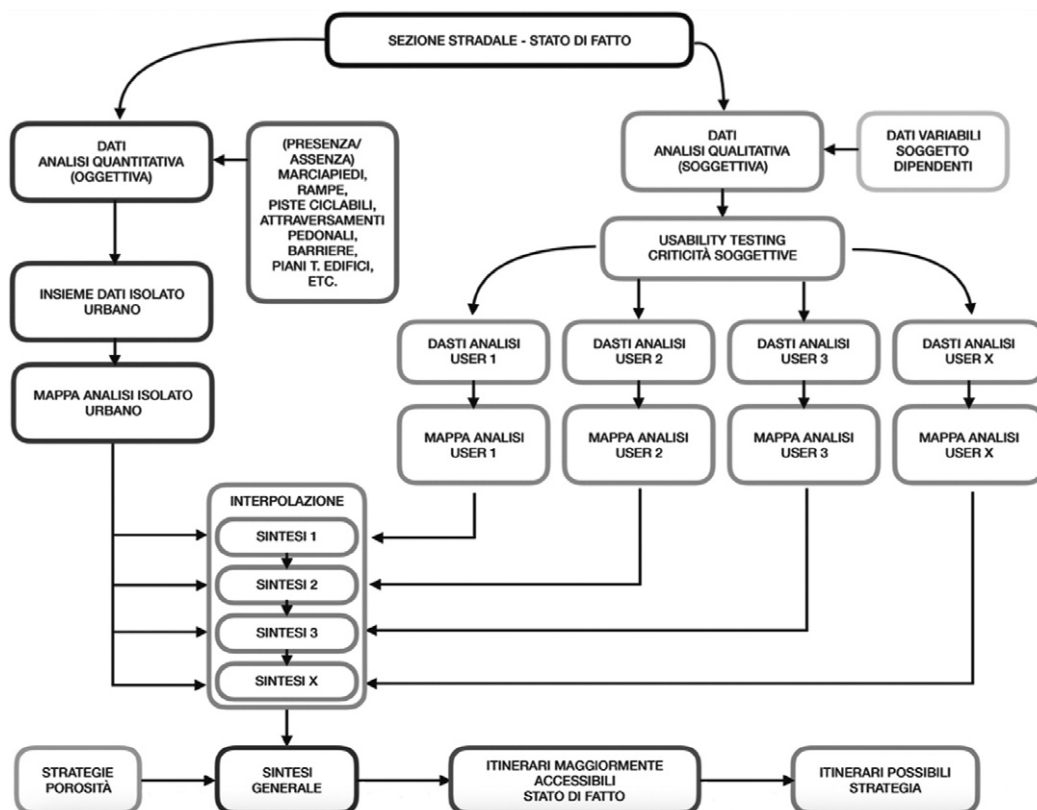


Fig. 3 | A Human Centered Design (HCD) methodological process applied to urban routes to define the steps necessary for usability testing; unlike a standard HCD process applied on defined objects, the displayed declination refers to the city, understood as a set of objects in space, which can change over time.

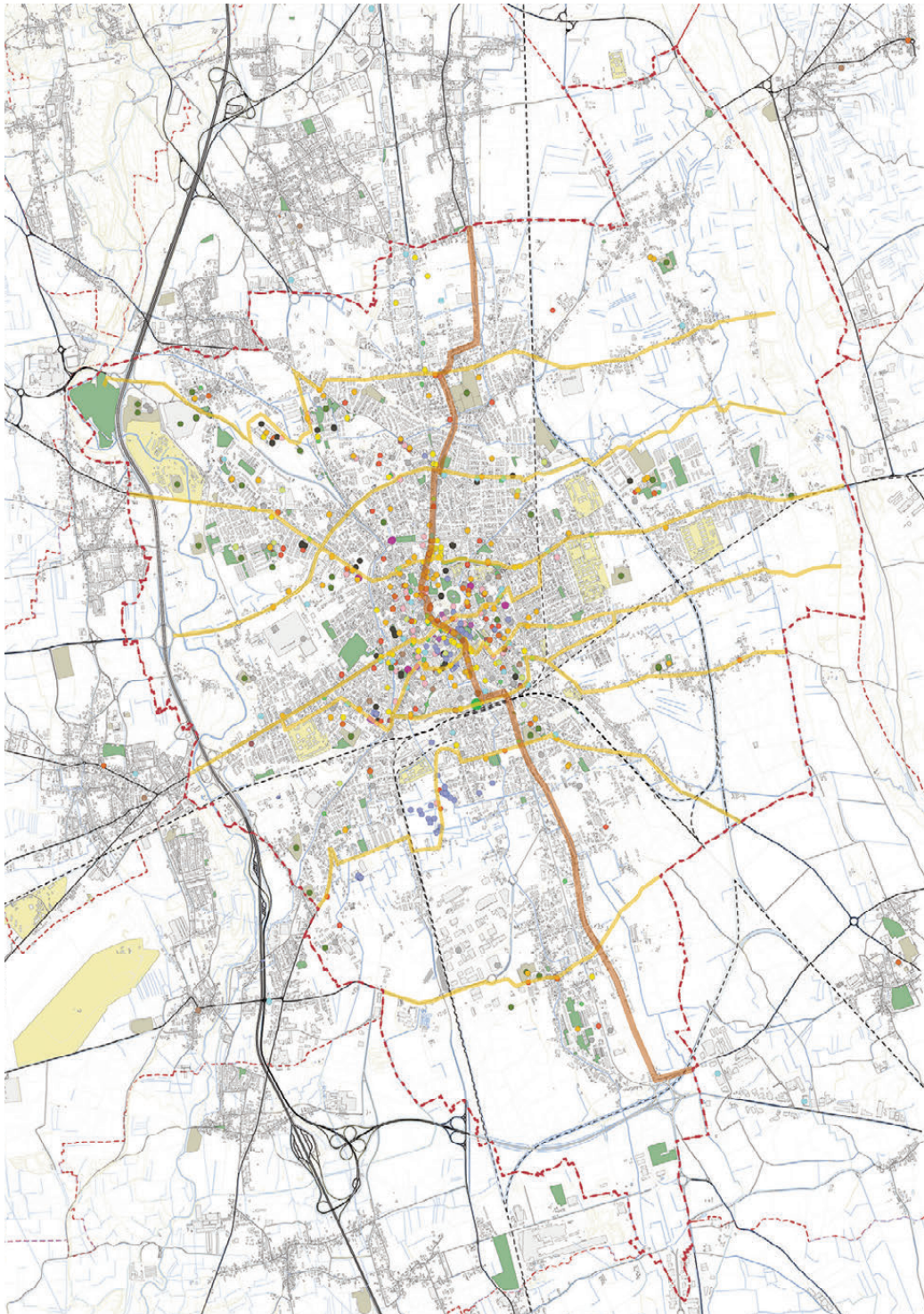


Fig. 4 | Plan of the city of Udine (red perimeter) in which the essential services (e.g. education, pharmacies, places of worship, health and welfare facilities, sports facilities, postal services, supermarkets) offered to the citizens are mapped. The identification of their location favoured the recognition of a main dorsal (orange) and some secondary ribs functional to their networking; these axes (transversal and longitudinal) were selected as the primary and preferential area of intervention for the drafting of the PEBA (credit: research project 'Abitare Udine – The PEBA for living the city'; graphics: A. Pecile).

tion is called into question both by the awareness of the modern respect for the diversity of individuals' physical and cognitive levels. Designing spaces catering to the needs of individuals with diverse personal behaviour conditions and perceptions is a challenge that requires an understanding of space and measurement. While physical limits are essential, it is equally important to consider the 'virtual' and perceptive extensions of the body that vary from person to person. This necessitates an awareness of the diversity of individuals and their unique needs. In this sense, Baron-Cohen³ (2017) sug-

gests abandoning the word 'disorder' (referring to the observation of the concerns of some individuals) and instead using 'difference / diversity', which must not imply something different from the norm; rather, it must be understood as synonymous with variability, variety, neurodiversity.

Baron-Cohen's new premise⁴ of taking the variability of people as its foundation stands in antithesis to the traditional canon of the Vitruvian man and, thus, to the idea of standardising the physical and perceptive components of the human body for defining the module. Space is a fabric of hidden

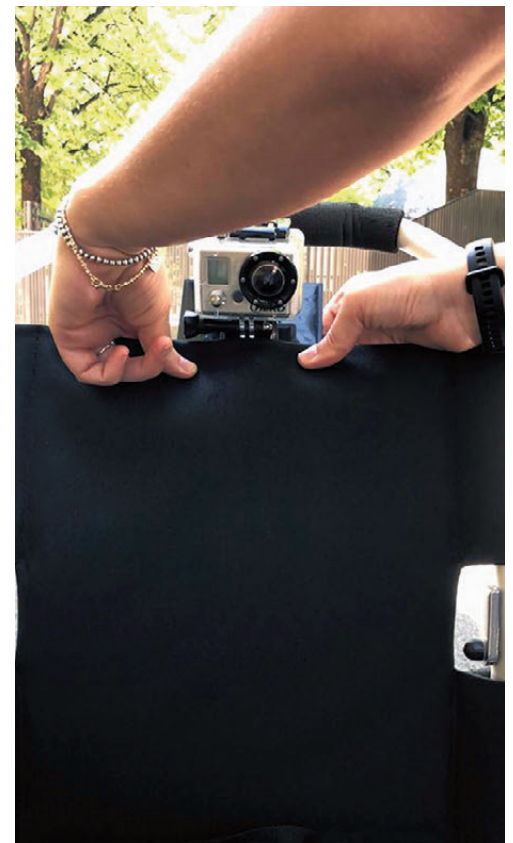
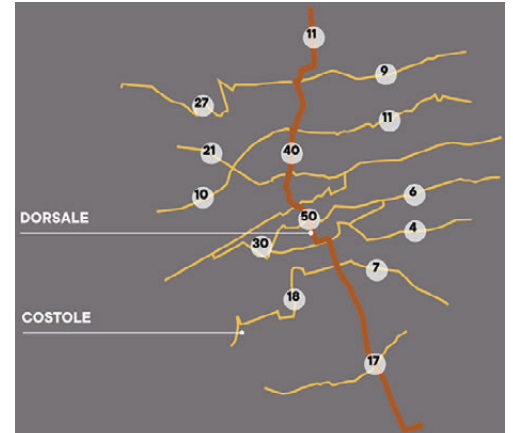


Fig. 5 | Graphical schematisation of the itineraries identified as preferential and primary areas for the drafting of the PEBA for the city of Udine: regarding Fig. 4, the main ridge is shown in orange and the secondary ribs in yellow; for each route, the essential services offered to the citizen were mapped and counted on a GIS platform (credit: research project 'Abitare Udine – The PEBA for living the city'; graphics: A. Pecile).

Figgs. 6, 7 | Setup of a go-pro on a wheelchair to create a video of the critical issues current and found on the intervention itineraries selected for the preparation of the PEBA, Udine; the operation was necessary to highlight the importance of changing the point of view of those who live in the city every day (credit: M. Milocco Borlini).

relationships that go beyond the designed proportions. For these reasons, it is not considered possible to think of a complete rationalisation of the idea of measure and, therefore, of the architectural module. The debate between the idea of space, perceptible, and proxemic aspects leads to a project of relative modularity to be implemented through a crossed and transversal reading of the different components. The latter contributes to establishing constants and differences in the design of spaces.

This investigation considers the variability of people as its foundation, including not only functional and material aspects but also social, perceptible, and ethical ones. Based on this matrix, a new synthesis is defined that is adaptable and consistent with the needs of contemporary society. The new synthesis promotes accessibility and social inclusion, particularly in architectural projects, with necessary reference to the concept of 'universal design' defined by the European Union⁵. After conducting several research projects to study person-environment relationships, the need to define modularity regarding the critical issues identified became apparent. These considerations result from both cross-reading the architectural and scientific contexts and the interdisciplinary, sociocultural and political framework.

The focus of this essay is limited to the functionality of spaces for optimal environmental accessibility. Taking the opportunity of the experiments carried out in public and private contexts, the modular variabilities regarding the different possible levels of personalisation were detected. During this process, the importance of dimensional adaptability became evident, both in public contexts (such as urban spaces, mobility systems, tertiary sectors, and commerce), where universal solutions are essential (Lauria, 2014), and in private settings (such as residences and protected institutions), where customised solutions are necessary for optimal comfort and functionality. It was identified that flexibility is necessary in the modular approach to cater to different types of users and intended uses. The results explicitly obtained in urban itineraries (Fig. 3) are significant, the nature of which involves a careful review of the needs of users and the performance of existing contexts, providing a complex picture of the critical issues which involve universal solutions (Conti, Milocco and Pecile, 2021).

This approach leads back to the disciplinary field of environmental accessibility, whose broad international scientific frame of reference, in the specifics of the research developed, made reference to the competencies of Architectural Technology through the use of an interdisciplinary and multi-professional approach networking with the various institutes committed to universal design. In the specific field of technological design, primary reference was made to the cluster competence network of the Italian Scientific Society of Architectural Technology (SITdA).

Discussion: originality and objectives | In the context of environmental accessibility, it is now considered necessary to revisit the rules and paradigms of architectural design, of which the module constitutes a founding element, in a universal design key (UN, 2006). The awareness of the variability of individuals today requires an evolution of the rules and principles underlying the systematic nature of the architectural project.

The statements referred to in this essay can be traced back to the activities carried out⁶ within the 'dalt' Laboratory⁷. It consists of a structure of the Polytechnic Department of Engineering and Architecture of the University of Udine, which provides teaching and research in the field of inclusive and universal design. This service fosters an enduring relationship and comparison with the leading institutions that operate in various capacities in the regional context of the Friuli-Venezia Giulia region (Italy). Applying environmental design paradigms, which involves a conscious understanding of the relationship between people and their environment, has led to developing design focuses and in-depth analysis in specific contexts. This multi-scalar and systemic approach focuses on applicable settings such as lifts, pedestrian crossings, cycle-pedestrian paths, specific places of use, and activities such as schools or museums.

The uniqueness of the investigated topics lies in the continuous process of updating the references and guidelines. This process is facilitated by networking with other research institutes at the national and international levels along with the constant comparison with leading operators who work in the regional context⁸ in different capacities, such as, for example, the University of Trieste. The research involved scheme exchanges with several institutions, including the Regional Center for Information on Architectural Barriers (CRIBA FVG)⁹, the technical service of the CRAD (Regional Council of Associations of Disabled People) and their families, the Municipality of Udine, and the Friuli-Venezia Giulia (FVG) Region. The multidisciplinary collaboration involved other Italian Universities; these exchanges were crucial to the research.

The outcome of these experiences is continuously updating the available regulatory and technical design tools for Universal Design. The updated tools are validated through concrete applications on specific, defined case studies. In the Italian context, Ministerial Decree 236/1989¹⁰ highlights how the regulatory apparatus, although performance-based, is now more outdated than ever since it still needs to complete the specific reference to the person. The same conclusion is obtained by analysing international regulations. The Americans with Disabilities Act (ADA) of 1990, the Accessibility for Ontarians with Disabilities Act (AODA), and the Equality Act 2010 in the United Kingdom are all documents that have a common denominator: making reasonable modifications to accommodate people with disabilities in all aspects of their lives. These documents do not always focus on the person from a spatial or modular point of view but contain directives from a legal, security and safety point of view. Precisely, the British Equality Act protects all minorities. In addition, these regulations are integrated from a building point of view with Document 'M', which provides designers with some guidelines to make establishments more accessible. From a modular and design point of view, it can be argued that the previous regulatory documents (US Congress, 1990; Parliament of the United Kingdom, 2016, 2010; HM Government, 2016; Legislative Assembly of Ontario, 2016) do not fully explain the requirements for the complete needs of modern diversity (Steinfeld and Maisel, 2012).

Methodology | The analysis focuses on the rela-



Figgs. 8-10 | Participation in a mapping session with stakeholders to highlight the critical issues in the selected study and project itineraries. The activity carried out within the research project 'Urban construction site – Ergonomics and human factors, technological innovation and building process' was functional to the definition of the variable points of view and ways of use with which the different subjects live daily the city (credit: M. Milocco Borlini).

Fig. 11 | Example of a linear and modular aid for the usability of a historic urban itinerary (credit: C. Conti).



Fig. 12 | Variability of functional height, action and position (credit: C. Conti).

Fig. 13 | Variability of people living in the same space (credit: C. Conti).

tionship between space and the variability of people, examining different scales of architecture. This study includes the urban scale and more specific environments, such as specific building features. The investigation also considers existing legislation related to these hierarchies of architecture. The concept of a module is closely linked to the definition of the individual's profile, whether a user or a stakeholder. Standardisation processes are then initiated based on this profile, which underlies the development of authority legislation. The applied experiments involved investigating scientific literature and conducting direct participation activities with citizens and users. Through these experiments, it became evident that personal experience is more subjective and variable than ever before.

An example on the urban scale is the normative application (in progress), which saw the University of Udine and the Municipality of Udine involved in a preliminary study for the drafting of the PEBA – Plan for the Elimination of Architectural Barriers (Fig. 4-7). The Central Infrastructure and Territory Directorate of the FVG Region decided to invest instrumentally by engaging with the Universities of Trieste and Udine to develop a monitoring system for environmental accessibility criticalities.

Over the years, the research has been committed to addressing critical environmental issues in different public and private contexts. The latter has been supported by multiple participation sessions with stakeholders (Fig. 8-11). This process has achieved an updated understanding of the legislation regulating public space design.

A founding element of the analysis process was located in the understanding of how the relational elements between user and environment change depending on how familiar space is, how recurrent the actions performed in it are, whether there are actual elements of hazard versus a dedicated and prosthetic environment, how frequent-

ed it is, and finally how the physical-technical lighting, acoustic and thermal components are controlled (Fig. 12, 13). The latter are issues which allow us to identify the specific possible interactions between the needs, requirements and desires that the user can activate a posteriori, i.e. chosen in a subjective and personal manner (Conti, Milocco Borlini and Tubaro, 2020).

The same considerations can be transferred to a specific modular device: the elevator. Previous research has investigated the vertical element of transportation with attention to accessibility, safety and design standards. The latter is exemplified in the application of European and international regulations and directives (ENI – ISO)¹¹, which allow, from a technological point of view, to define the spatial dimensions of the lift 'shell' (Conti, Milocco and Tubaro, 2020; Fig. 14-16). Among the most engaging, we find EN 17210, which defines minimum requirements to limit 'spatial discrimination' following the principles of Universal Design: in short, the lift, as a module, must provide for the variability of the person in a more precise and inclusive manner (Giacomello et alii, 2021).

Conclusions and possible future implications |

The literature review of national and international authors developed a theoretical premise that was applied to real case studies. A key finding of the case studies was the importance of adopting a holistic reading method, which overcomes standardisation to configure a 'user module' capable of accommodating individuals of different abilities and needs to better interact with the built environment. The supported theory proposes a critical re-reading of the concept of 'module' where measurement is modernised as it is no longer physically and perceptually universal. This revision is only conceptual, as the module remains the essence of the architectural project in its variability. The arguments presented seem to lead towards a new flexibility of modular parameters according to a biopsychosocial model, as defined by the International Classification of Functioning (IFC), Disability and Health.¹²

Considering the Italian context, it is evident that the case is still open and continuously evolving, requiring cultural adaptation and updating. Fluidity is necessary for the different specialisms involved in the project for the person to interact synergistically. The same conclusions are also applicable to the international experiences mentioned previously.

Although more advanced in some prescriptive aspects (see the British 'M' document), there is undoubtedly room for possible integrations and future developments that could provide a more inclusive universalisation based on variable modularity depending on the user. Taking human variability as its matrix with aspects that are not only practical but also social, perceptive, and ethical, the investigation reaches the definition of a new synthesis mutable in coherence with the needs of an evolving contemporaneity.

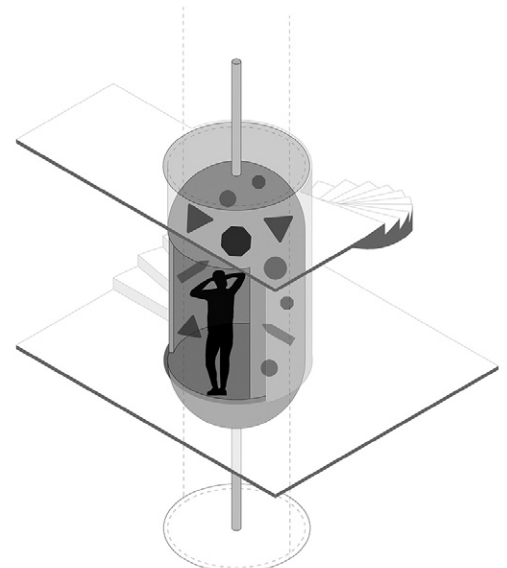
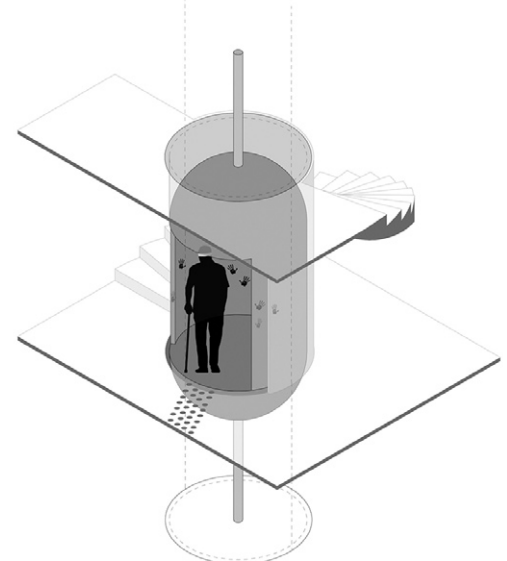
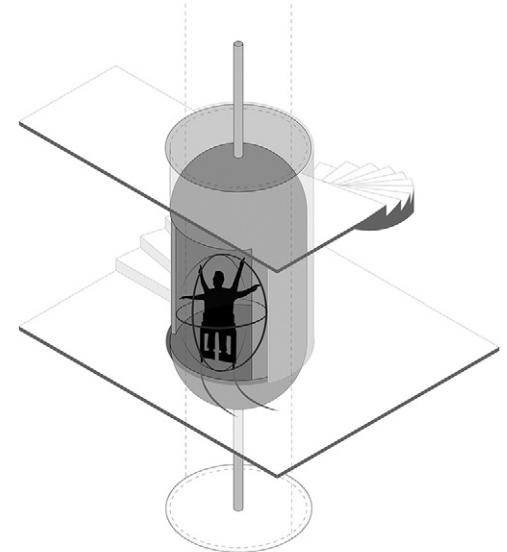


Fig. 14-16 | Elevator and multisensuality (credits: L. De Stasio and E. Rieppi, 2019).

Acknowledgements

The contribution, resulting from a joint reflection, must be assigned equally to all the Authors.

Thanks to Jack Nodwell for English proofreading.

Notes

1) The Convention of the Rights of Persons with Disabilities (UN, 2006) was ratified in Italy with Law n. 18/2009.

2) Proxemics is the science that studies space or distances as a communicative fact, that is, the analysis of the possible meanings of the material distances that man tends to impose between himself and others (Oxford Languages Dictionary, 2023).

3) British psychologist and Professor of Developmental Psychopathology at the University of Cambridge.

4) The contents of this article are the result of a collegial cultural comparison of the authors and of research on environmental accessibility financed by the University of Udine as part of the initiatives to support the University Strategic Plan 2022-25 – ESPeRT Interdepartmental Project. The research, as a whole, is based on the results achieved over the years in the context of various experiments, as specified in the text. The authoritativeness of the contribution is equally attributable to the authors.

5) The art. 2 of the CRPD (UN, 2006, p. 4) defines Universal Design as «[...] the design of products, environments, programmes and services to be usable by all people, to the greatest extent possible, without the need for adaptation or specialized design. ‘Universal design’ shall not exclude assistive devices for particular groups of persons with disabilities where this is needed».

6) The following experiments are hereby reported as reference: 2018 – UniUD, ‘Urban construction site – Ergonomics and human factors, technological innovation and building process’ (FVG Region funding, P.I. Prof G. Tubaro); 2020 – UniUD, ‘Cantiere città’ (FVG Region funding; Principal Investigator Prof. C. Conti); 2020-21 – Municipality of Udine and UNIUD, ‘Abitare Udine. Il PEBA per vivere la città’; 2009 – ongoing CRAD FVG with UniUD, ‘Accordo quadro per la condivisione con il CRIBA FVG di proposte, ambiti di indagine e attività’ (Principal Investigator Prof. C. Conti; Working group: S. Cioci, E. Frattolin, M. Milocco Borlini, A. Pecile, Arch. E. Dalla Betta, Arch. R. Shaurli, Dr. P. Ruscich). Alongside the shared and preliminary reasoning for defining the Research Programs on the 2020-2022 and 2022-2025 Agreements with the FVG Region, UNITS and UniUD in implementing the Regional Law n. 10/2018 and its uniform execution throughout the regional territory. The research commitment, referred to in the agreements indicated above, was accompanied by various in-depth studies on protected residential living for people with autism in confined environments (elevators, pedestrian crossings, car parks), on the natural environment (parks and gardens), on the materials, techniques and products of the building system with recent attention also to the use of graphic components. Applied experimentation has always been accompanied by a commitment to understanding and defining basic network guidelines with other national and international university institutes and the Italian Scientific Society of Architectural Technology (SITdA).

7) The ‘dalt’ Laboratory for Architecture teaching and research on environmental accessibility was established in 2009 at the then Department of Civil Engineering and Architecture of the University of Udine (Principal Investigator Prof. C. Conti), promoted by the Regional Council of Associations of Disabled People and their Families CRAD FVG and encouraged by the Coordination Committee of the Province of Udine to provide a scientific response to an express request from the territory.

8) It is helpful to refer to the E.A. (Environmental Accessibility) Cluster of the SITdA, which promotes research, dissemination and teaching initiatives that aim to achieve a culture of inclusiveness and suitability for use for the broadest spectrum possible of people.

9) From November 2018, under Art. 5 of the Regional

Law n. 10/2018, CRIBA FVG acts as a single regional centre for accessibility.

10) Italian Decree of the Ministro dei Lavori Pubblici 14 giugno 1989, n. 236 – ‘Prescrizioni tecniche necessarie a garantire l’accessibilità, l’adattabilità e la visitabilità degli edifici privati e di edilizia residenziale pubblica, ai fini del superamento e dell’eliminazione delle barriere architettoniche’ (lit. ‘Technical requirements necessary to guarantee the accessibility, adaptability and visitability of private and public residential buildings, to overcome and eliminate architectural barriers’).

11) For further information, consult the following Directives: 2014/33/EU, UNI EN 81-20, EN 81-70, CEN/TS 81-76, EN 81-80, 95/216/EC and EN 17210.

12) The International Classification of Functioning, Disability and Health was developed and introduced in 2001 by the World Health Organization and is configured as a classification tool that analyses and describes disability as a personal experience that everyone can experience.

References

Albiero, R. (1999), *Architettura e Misura – Indagine sul concetto di misura in Architettura*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Progettazione Architettonica e Urbana, XI ciclo, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura. [Online] Available at: opac.biblio.polimi.it/sebina/repository/link/oggetti_digitali/fullfiles/PERL-TDDE/TESI_2000-084.PDF [Accessed 6 October 2023].

Baron-Cohen, S. (2017), ‘Editorial Perspective – Neurodiversity – A revolutionary concept for autism and psychiatry’, in *The Journal of Child Psychology and Psychiatry*, vol. 58, issue 6, pp. 744-747. [Online] Available at: doi.org/10.1111/jcpp.12703 [Accessed 6 October 2023].

Baratta, F. L., Conti, C. and Tatano, V. (2019), *Abitare inclusivo – Il progetto per una vita autonoma e indipendente | Inclusive Living – Design for ad autonomous and independent living*, Anteferma Edizioni, Conegliano.

Conti, C., Milocco Borlini, M. and Pecile, A. (2021), ‘Healthy and Inclusive Cities – Overcoming Architectural Barriers, in the Social, Safety, and Health Spheres of the URBAN-HUMAN Interaction Systems’, in Giofrè, F. and Halilović-Terzić, S. (eds), *HURBE 2021 Conference Proceedings – Making Healthy Cities for People (4-5 October 2021)*, University of Sarajevo, Faculty of Architecture, Sarajevo, pp. 197-206. [Online] Available at: public.3.basecamp.com/p/M2bjHct8ZrfaipzexibZrTuR [Accessed 6 October 2023].

Conti, C., Milocco Borlini, M. and Tubaro, G. (2020), ‘Vertical travel – The multi-sensory accessibility of vertical transition environments in museum itineraries’, in Trabucco, D., Giacomello, E. and Belmonte, M. (eds), *Mobilità verticale per l’accessibilità – Oltre il Quadrato e la X – Vertical Mobility for Accessibility*, Anteferma, Conegliano. [Online] Available at: academia.edu/42269291/_Chapter_C_Conti_M_Milocco_Borlini_G_Tubaro_2020_Vertical_Travel_The_Multi_sensory_Accessibility_of_Vertical_Transition_Environments_in_Museum_Itineraries_in_D_Trabucco_E_Giacomello_M_Belmonte_Eds_Oltre_il_Quadrato_e_la_X_Vertical_Mobility_for_Accessibility_Congliano_Anteferma [Accessed 6 October 2023].

Engel, G. L. (1977), ‘The need for a new medical model – A challenge for biomedicine’, in *Science*, vol. 196, article 4286, pp. 129-136. [Online] Available at: doi.org/10.1126/science.847460 [Accessed 6 October 2023].

Giacomello, E., Milocco Borlini, M., Pavan, D., Conti, C. and Trabucco, D. (2021), ‘Accessibility Performance for a Safe, Fair, and Healthy Use of the Elevator’, in Black, N. L., Neumann, W. P. and Noy, I. (eds), *IEA 2021 – Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association*, Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 2 – Inclusive Design, Springer, Cham, pp. 255-262. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-74605-6_32 [Accessed 6 October 2023].

HM Government (2016), *The Building Regulations 2010 – Correction to the Approved Documents – 2015 edition including 2016 amendments approved Document M*, voll. 1-2. [Online] Available at: gov.uk/government/publications/

access-to-and-use-of-buildings-approved-document-m [Accessed 6 October 2023].

Iwarsson, S. and Ståhl, A. (2003), ‘Accessibility, usability and universal design – Positioning and definition of concepts describing person-environment relationships’, in *Disability and Rehabilitation*, vol. 25, issue 2, pp. 57-66. [Online] Available at: doi.org/10.1080/dre.25.2.57.66 [Accessed 6 October 2023].

Lauria, A. (2017), ‘Progettazione ambientale e accessibilità – Note sul rapporto persona-ambiente e sulle strategie di design | Environmental design and accessibility – Notes on the person-environment relationship and on design strategies’, in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 13, pp. 55-62. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-21134 [Accessed 6 October 2023].

Lauria, A. (2014), ‘L’Accessibilità come ‘sapere abilitante’ per lo Sviluppo Umano – Il Piano per l’Accessibilità | Accessibility as a ‘key enabling knowledge’ to Human Development – The Accessibility Plan’, in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 7, pp. 125-131. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-14541 [Accessed 6 October 2023].

Legislative Assembly of Ontario (2016), *Accessibility for Ontarians with Disabilities Act*. [Online] Available at: ontario.ca/laws/statute/05a11 [Accessed 6 October 2023].

Lorenzo-Palomera, J., Fuentes-Pérez, C. and Aranda-Jiménez, Y. (2022), ‘Le Corbusier’s Modulor – Anthropometric Myth’, in *Civil Engineering and Architecture*, vol. 10, issue 1, pp. 112-120. [Online] Available at: doi.org/10.13189/cea.2022.100110 [Accessed 6 October 2023].

Parliament of the United Kingdom (2010), *Equality Act 2010*. [Online] Available at: legislation.gov.uk/ukpga/2010/15/contents [Accessed 6 October 2023].

Parliament of the United Kingdom (1995), *Disability Discrimination Act 1995*. [Online] Available at: legislation.gov.uk/ukpga/1995/50/contents [Accessed 6 October 2023].

Steinfeld, E. and Maisel, J. (2012), *Universal Design – Creating Inclusive Environments*, John Wiley & Sons.

UN – United Nations (2006), *Convention of the Rights of Persons with Disabilities*. [Online] Available at: ohchr.org/sites/default/files/Ch_IV_15.pdf [Accessed 6 October 2023].

US Congress (1990), *Americans with Disabilities Act – Title 42 – The Public Health and Welfare*. [Online] Available at: ada.gov/law-and-regs/ada/ [Accessed 6 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	18 September 2023
Revised	15 October 2023
Accepted	29 October 2023
Published	31 December 2023

STAMPA 4D PER COMPONENTI COSTRUTTIVI MODULARI

Applicazioni e principali sviluppi

4D PRINTING FOR MODULAR CONSTRUCTION COMPONENTS

Applications and main developments

Renata Morbiducci, Salvatore Polverino, Caterina Battaglia

ABSTRACT

A partire dalla fine del XX secolo le tecniche di fabbricazione digitale sono state caratterizzate da una rapida espansione nei diversi ambiti dell'attività umana. In particolare nel settore delle costruzioni il loro impiego ha consentito la produzione di inediti componenti modulari, personalizzabili in base agli specifici requisiti di impiego. In tale ambito si inserisce l'utilizzo delle tecniche di manifattura additiva mediante stampa 4D per la produzione di elementi modulari responsivi; questi ultimi, tuttavia, nonostante siano in grado di contribuire alla mitigazione degli effetti del cambiamento climatico, sono ancora scarsamente impiegati. Il presente saggio intende analizzare le principali peculiarità delle tecniche di stampa 4D per la produzione di elementi modulari per l'architettura, evidenziandone le potenzialità e i principali limiti che ne influenzano l'impiego.

Since the end of the 20th century, a rapid expansion has characterised digital fabrication techniques in different areas of human activity. In particular, in the construction sector, their use has enabled the production of unprecedented modular components that can be customised according to specific application requirements. This includes the use of additive manufacturing techniques employing 4D printing for the production of responsive modular elements. However, despite being able to contribute to mitigating the effects of climate change, they are still scarcely used. This essay intends to analyse the main peculiarities of 4D printing techniques for the production of modular elements for architecture, highlighting their main limitations and potentialities that influence their use.

KEYWORDS

materiali innovativi, materiali intelligenti, stampa 4D, manifattura additiva, costruzione modulare

innovative materials, smart materials, 4D printing, additive manufacturing, modular construction

Renata Morbiducci, Architect and PhD, is a Full Professor of Technical Architecture at the University of Genoa (Italy), a member of the NGO RINGO, COP-UNFCCC Delegation and a Scientist Responsible for international and national projects. She researches the themes of innovation in building techniques for the environmental sustainability of the construction sector. E-mail: renata.morbiducci@unige.it

Salvatore Polverino, Building Engineer-Architect and PhD, is a Researcher in Technical Architecture at the University of Genoa (Italy). He researches construction techniques and applications of technologically advanced materials in architecture and construction. E-mail: salvatore.polverino@unige.it

Caterina Battaglia, Engineer and PhD Candidate at the Department of Architecture and Design of the University of Genoa (Italy), carries out research in building site digitisation and technological innovation, focusing on the potential of 3D printing in the construction sector. E-mail: caterina.battaglia@edu.unige.it



Il settore delle costruzioni rappresenta una componente fondamentale del mercato economico mondiale (Ghobakhloo, 2020) e si stima che attualmente produca un volume di investimenti pari a 9,7 trilioni di dollari, valore che è destinato ad aumentare in maniera consistente nel corso del prossimo decennio fino a raggiungere la soglia dei 14 trilioni entro il 2037 (Oxford Economics, 2023). Nonostante sia uno degli ambiti trainanti del sistema economico il settore delle costruzioni è stato solo parzialmente investito dalle molteplici innovazioni che hanno rivoluzionato i principali campi dell'attività umana negli ultimi anni (Fig. 1; Oke et alii, 2023); infatti, a causa di numerose barriere culturali, sociali ed economiche, la piena transizione verso una nuova realtà evolutiva, la cosiddetta Costruzione 4.0 (El Jazzer et alii, 2020), è un processo ancora problematico e tuttora in itinere. Le difficoltà di evoluzione del settore edile vanno di pari passo con la crescente sensibilità verso la sostenibilità ambientale ed energetica, che richiede un cambio del paradigma con l'adozione di strategie e azioni etico-economiche ormai imprescindibili, tra le quali un uso oculato delle risorse non rinnovabili, per contrastare gli effetti del cambiamento climatico (Gallego-Schmid et alii, 2020) e le ricadute determinate dai recenti avvenimenti bellici (Hryhorovskiy et alii, 2022).

A fronte del suddetto scenario è possibile individuare numerose tendenze di ricerca che riguardano il processo di costruzione, in particolare la digitalizzazione, e il prodotto finale, con la comparsa di inedite soluzioni tecniche ad alte prestazioni (Ribeirinho et alii, 2020). Negli ultimi anni le modalità di realizzazione dei componenti costruttivi sono cambiate, accostando alla standardizzazione di massa una produzione personalizzata rivolta a specifiche esigenze di impiego (Pasco, Lei and Aranas, 2022); tale evoluzione è resa possibile grazie alle tecnologie produttive digitali e a nuove figure professionali con competenze transdisciplinari (Canestrino, 2021) animate anche dalla volontà di raggiungere una nuova forma di società incentrata sull'autoproduzione (Russo and Morretti, 2020), una modalità di realizzazione accessibile a tutti, facilmente replicabile e a costo contenuto (Pone, 2022).

Nell'ambito delle costruzioni, tra le tecnologie impiegate nella fabbricazione digitale che hanno conosciuto una significativa evoluzione negli ultimi anni, vi è la manifattura additiva (Li et alii, 2020; Fig. 2); tale sviluppo è stato possibile sia grazie al progressivo aumento delle dimensioni dell'elemento stampato, che ha consentito la 'produzione' anche di intere abitazioni (Sposito and Scalisi, 2017), sia attraverso l'impiego di materiali innovativi altamente performanti e in grado di rispondere alle sempre più pressanti questioni ambientali; esempi rilevanti sono le sperimentazioni di Italcementi sull'impiego di compositi cementizi per la stampa 3D o dell'italiana WASP con il ritorno a materiali naturali quali la terra cruda e fibre vegetali (Di Dio et alii, 2022).

Contemporaneamente le scienze dei materiali da costruzione hanno condotto ricerche con l'obiettivo di conferire un'inedita dinamicità ai componenti edilizi, donando all'involucro esterno una capacità di adattamento e responsività alle sollecitazioni esterne (Jang, Lee and Kim, 2013); per superare la necessità di impiegare sensori e attuatori, si è intervenuti sulla progettazione della

materia a scala nanometrica, creando una nuova categoria che è quella dei cosiddetti 'smart materials' (Clifford et alii, 2017). La manifattura additiva ha impiegato tali materiali per la produzione di elementi modulari ispirati al mondo naturale (Paoletti, 2017; Tucci, 2017), caratterizzandoli di recente con una quarta dimensione (4D) per impiegarli come elementi costruttivi dinamici e adattivi attraverso un approccio customer-based (Haleem et alii, 2021): in tal modo si possono ottenere componenti edilizi complessi ottimizzati per le particolari condizioni d'impiego, in grado di adattarsi ai continui cambiamenti ambientali e con un elevato livello di prestazioni.

La stampa 4D, nonostante le enormi potenzialità nel campo delle costruzioni, è oggi principalmente impiegata in settori tecnologicamente più avanzati, come quello dell'ingegneria biomedica (Agarwal et alii, 2021); tra i diversi limiti per un'applicazione del 4D nel settore edile è da segnalare l'incompatibilità tra tecniche di produzione e la scala di applicazione. Per superare tali limiti, il concetto di modulo, inteso come unità elementare di un insieme, ripetibile e riproducibile, riveste un ruolo fondamentale: le caratteristiche di flessibilità, adattabilità, facilità di trasporto e montaggio, proprie della discretizzazione di elementi costruttivi in componenti modulari, rendono superabili i limiti di scalabilità tuttora presenti (Minunno et alii, 2020).

Tuttavia, malgrado vi sia un crescente interesse riguardo l'applicazione di tecniche di manifattura additiva nel settore delle costruzioni, il tema del rapporto tra modularizzazione e stampa 4D è ancora scarsamente affrontato in letteratura e risulta solo marginalmente analizzato il graduale passaggio tra la produzione edilizia 3D e l'impiego della tecnica 4D in costruzioni modulari.

Con il presente saggio gli Autori vogliono intervenire all'attuale dibattito sull'applicazione delle tecniche di fabbricazione digitale in architettura, analizzando il rapporto tra la modularizzazione nei processi di manifattura additiva e la stampa 4D nel settore delle costruzioni, al fine di un progressivo sdoganamento di tali soluzioni per la realizzazione di edifici adattivi e responsivi. Per raggiungere la predetta finalità il saggio analizza dapprima le principali tendenze di ricerca sull'impiego di elementi modulari prodotti con manifattura additiva, per poi soffermarsi sulle maggiori peculiarità del processo di stampa 4D e, infine, esamina i principali fattori che ne hanno agevolato o limitato l'impiego nel settore delle costruzioni. Tale disamina avviene attraverso un'analisi delle prime applicazioni della stampa 4D in architettura ed edilizia, delineandone i possibili sviluppi futuri.

In particolare il presente lavoro prende in esame specifici casi studio che rappresentano esempi emblematici di come il processo di modularizzazione consenta l'applicazione di tecniche proprie della manifattura additiva nell'ambito delle costruzioni e permetta l'introduzione dell'elemento temporale quale parametro progettuale, superando la tradizionale staticità dell'opera costruttiva. Si vuole, dunque, costituire una base di conoscenza per future attività di ricerca sulle possibili applicazioni di sistemi modulari realizzati mediante stampa 4D da impiegarsi, ad esempio, per la realizzazione di involucri edilizi adattivi.

Il modulo per la manifattura digitale nelle costruzioni | A partire dalla fine della prima decade

del XXI secolo si è assistito a un progressivo salto di scala dell'oggetto stampato, con la comparsa dei primi esempi di abitazioni realizzate attraverso tecniche di fabbricazione digitale (Sposito and Scalisi, 2017), tra cui quelle prodotte con processo di estrusione a controllo assiale o con il contour crafting, che consiste nella distribuzione per strati di miscele cementizie. In breve tempo, a partire dall'anno della sua presentazione nel 2009 presso la University of Southern California, quest'ultima tecnica si è rapidamente diffusa nel settore delle costruzioni, consentendo la realizzazione di interi edifici (Paolini, Kollmannsberger and Rank, 2019).

I principali limiti di queste prime applicazioni sono riconducibili alla scarsa scalabilità del processo, in quanto le dimensioni del manufatto realizzabile dipendono dal raggio di azione delle strumentazioni a disposizione (Hager, Golonka and Putanowicz, 2016); inoltre la tipologia di materiale impiegata è spesso caratterizzata da un ciclo produttivo altamente impattante, in contrasto con le ormai imprescindibili istanze di sostenibilità ambientale (Heywood and Nicholas, 2023).

Per far fronte alla prima problematica evidenziata sono comparse le prime esperienze tese a una riduzione di scala delle attrezzature per la stampa; in quest'ambito sono comprese le prime esperienze inerenti all'uso di operatori robotici di dimensioni contenute che, a seguito della discretizzazione dell'opera in moduli, procedono parallelamente alla costruzione del manufatto edilizio. Tali tecniche presentano numerosi vantaggi rispetto alla stampa tradizionale tra cui, ad esempio, la maggiore mobilità, manovrabilità e libertà di scelta dei materiali da impiegare, in quanto, con una costruzione 'diffusa', sono superati i limiti dimensionali e operativi delle attrezzature tradizionali di stampa. Nel contempo, uno dei principali limiti di tale approccio è rappresentato dalla possibilità di realizzare unicamente strutture verticali, mentre, per gli elementi orizzontali, occorre adottare una produzione a pie d'opera e il successivo montaggio (Dörfler et alii, 2022).

La discretizzazione del manufatto edilizio in moduli, da realizzare in parallelo, è alla base anche dell'esperienza che ha portato alla costruzione della DFAB House, sviluppata e realizzata dall'ETH di Zurigo; tale costruzione, che costituisce uno dei primi esempi di edificio abitabile realizzato unicamente mediante tecniche di fabbricazione digitale (Graser, Kahlert and Hall, 2021), è collocata all'interno di una struttura denominata NEST (Fig. 3), dove ogni singola unità abitativa costituisce un modulo sperimentale abitabile, tenuto al rispetto della normativa edilizia locale. La DFAB House, in particolare, costituisce la porzione di edificio posta all'ultimo piano del complesso e la sua realizzazione ha visto l'unione di diverse tecniche della fabbricazione digitale, il cui collante è stata la discretizzazione degli elementi costruttivi in componenti modulari realizzati in sito o presso le aziende partner del progetto (Graser, Kahlert and Hall, 2021; Fig. 4).

Il concetto di modularizzazione dell'opera da realizzare è presente anche nelle esperienze di ricerca relative alle tecniche di manifattura additiva incentrate sull'utilizzo di materiali sostenibili; tra quest'ultime si ricordano le sperimentazioni sull'impiego di miscele a base di terra cruda, elementi naturali caratterizzati da un basso impatto ambientale (Sposito and Scalisi, 2019). In tale ambito di

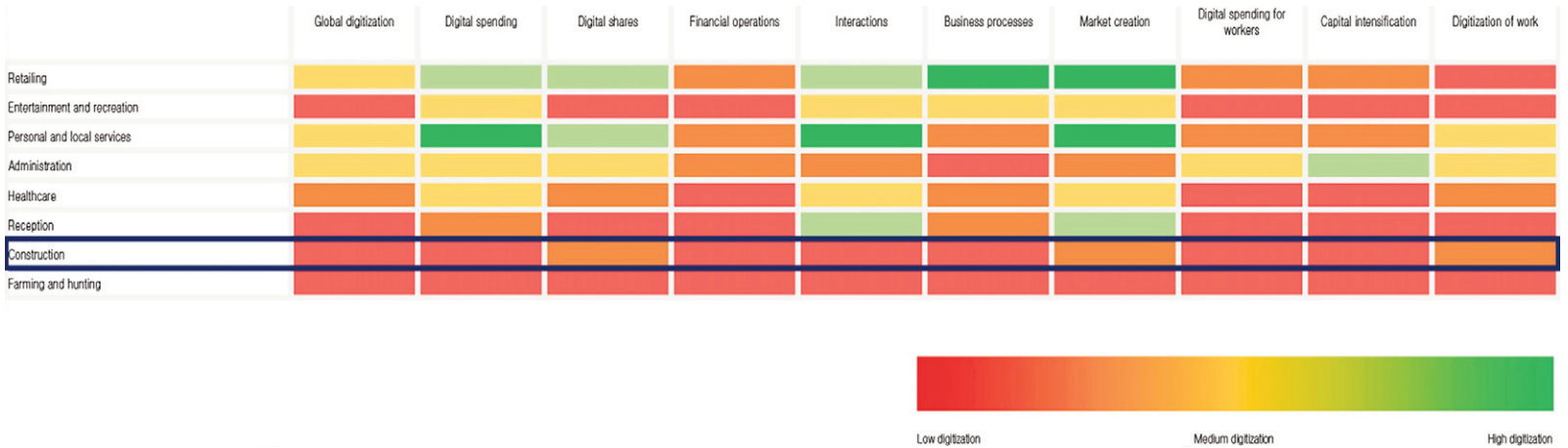


Fig. 1 | Level of digitisation in the construction sector (source: McKinsey Global Institute, 2017; adapted by the Authors, 2023).

ricerca, si segnala l'attività dello IAAC di Barcellona in collaborazione con WASP, che nel 2022 ha condotto alla realizzazione di TOVA, il primo edificio spagnolo stampato interamente in 3D tramite l'impiego di una miscela a base di terra, aloe, albume d'uovo ed enzimi (Fig. 5). L'esperienza maturata da WASP in altri progetti precedenti, quali Gaia e Itaca, ha permesso la realizzazione di elementi murari modulari stampati con materiale recuperato a meno di 50 metri dal sito di costruzione, mediante la tecnica di stampa Crane (IAAC, 2022).

Le suddette esperienze sperimentali, sebbene rappresentative dell'evoluzione delle tecniche di manifattura additiva nel campo delle costruzioni, sono ancora legate a metodologie proprie di un'architettura tradizionale, di tipo statico e non capace di adattarsi al variare delle condizioni ambientali; a questo proposito, la volontà di conferire dinamicità al manufatto prodotto ha favorito lo sviluppo di tecniche di produzione 4D introducendo così la dimensione temporale.

Stampa 4D quale ultima frontiera della manifattura additiva | Nonostante la fabbricazione digitale sia un processo che risale al finire del XX secolo, la stampa 4D è stata teorizzata per la prima volta solo nel 2014 ed è stata definita come tecnica di manifattura additiva che consente la produzione di elementi in grado di cambiare la propria forma o struttura se sottoposti a stimoli esterni (Tibbits, 2014). Questa prima definizione, introdotta dai ricercatori del MIT di Boston, comprende solo componenti caratterizzati da una dinamicità della forma, ma in seguito altri Autori hanno inglobato in tale categoria ulteriori tipologie di reazioni, come, ad esempio, la variazione delle proprietà ottiche (Pei, 2014).

L'innovazione in questo campo, rispetto alle tecniche 3D tradizionali, risiede nel materiale impiegato, capace di reagire a stimoli esterni e definito quindi smart (Addington and Schodek, 2005). In particolare l'aspetto innovativo risiede nel meccanismo di reazione che è insito nella materia, senza un deterioramento della stessa (Rastogi and Kandasubramanian, 2019), e che opera in maniera autonoma permettendo così di ottenere elementi definiti auto-assemblanti (Khoo et alii, 2015).

Dall'analisi delle esperienze applicative emerge come il processo di stampa 4D sia caratterizzato dalle seguenti fasi (Fig. 6): progettazione del modello matematico dell'elemento, scelta della

tecnica di fabbricazione digitale, selezione dello smart material e, infine, la verifica del meccanismo di reazione (Momeni et alii, 2017). Mentre per la realizzazione del componente si adottano le tecniche di produzione proprie della stampa 3D (Pei, Loh and Nam, 2020), quali ad esempio la modellazione a deposizione fusa (FDM) o a filo fuso (FFM)¹, ciò che connota il processo illustrato è l'importante ruolo rivestito dalle fasi di progettazione e scelta del materiale; infatti solo attraverso una rigorosa modellazione matematica è possibile ottenere l'esatta morfologia del componente tale da innescare i processi di adattamento al variare delle condizioni ambientali.

Dalla scelta del materiale smart da impiegare deriva la suscettibilità a determinati stimoli e il conseguente meccanismo di reazione. Principalmente sono impiegati elementi a memoria di forma a base di leghe metalliche (Shape Memory Alloys – SMA) o polimeri (Shape Memory Polymers – SMP), come riportato in Tabella 1. Le leghe rispondono a stimoli di tipo elettromagnetico o alla variazione di temperatura e le più utilizzate nel settore delle costruzioni, quali sensori e attuatori, sono a base di nichel-titanio (Fiorito et alii, 2016; Kim et alii, 2023). I polimeri a memoria di forma sono caratterizzati da un'elevata duttilità di impiego che ne consente l'uso in strutture composite o programmabili, in cui è possibile ottenere molteplici forme al variare delle condizioni ambientali (Ahmed et alii, 2021). In base al meccanismo di reazione gli SMP sono distinguibili in materiali reagenti al calore o termoreattivi (Ansari et alii, 2018), alla luce o fotoreagenti (Li, Schenning and Bunning, 2019), all'energia magnetica (Filipcsei et alii, 2007) o all'acqua (Zhang et alii, 2022).

Le attuali applicazioni della stampa 4D sono, però, limitate a quei settori tecnologici (robotica, aerospaziale, biomedicale, ecc.) maggiormente inclini alla sperimentazione di nuove tecniche e dove è consolidato l'impiego di materiali a memoria di forma (Strzelec, Sienkiewicz and Szmechtyk, 2020); infatti, in tali campi, l'introduzione della tecnologia 4D ha consentito un'ulteriore evoluzione del livello tecnologico, favorendo l'uso di soluzioni personalizzate in grado di adattarsi alle molteplici condizioni di operatività. Solo negli ultimi anni tali peculiarità sono state valorizzate anche nell'ambito delle costruzioni, arrivando a essere parte del più ampio processo di trasferimento di innovazione dai settori tecnologicamente avanzati a quello

edilizio, così come già avvenuto in passato per altre soluzioni all'avanguardia (Miodownik, 2015).

Il modulo nelle costruzioni 4D | Fin dalle prime sperimentazioni la stampa 4D è sempre stata strettamente connessa al concetto di modulo. Lo stesso Tibbits infatti, ancor prima di introdurre il concetto nel 2014 quale tecnica di produzione basata sulla fabbricazione digitale di elementi auto assemblanti (Tibbits, 2014), nel 2012 ha teorizzato la possibilità di discretizzare le architetture in elementi modulari in grado di comporre autonomamente strutture complesse (Tibbits and Cheung, 2012). Tale teorizzazione, oltre a concettualizzare nuove possibili tecniche costruttive che comporterebbero risparmi in termini di tempi e costi di realizzazione, introduce il concetto di 'materiale vivente', dove il singolo componente costruttivo cresce evolvendo nel tempo a partire dalla sua produzione.

L'idea di elementi modulari viventi è stata alla base di diversi programmi di ricerca tra cui l'Engineered Living Materials (ELM), lanciato nel 2016 dalla Defense Advanced Research Project Agency (DARPA, 2016) del Governo USA e finalizzato alla realizzazione di materiali di origine naturale, fabbricati digitalmente, in grado di possedere capacità autoriparanti e di adattamento alla variazione delle condizioni ambientali.

Nel suddetto contesto si collocano i primi pionieristici lavori del Mediated Matter Lab del MIT finalizzati alla produzione di elementi modulari dinamici mediante tecniche di bio-stampaggio (Smith et alii, 2020); quest'ultime sono impiegate per la realizzazione di strutture a torre denominate Agua-hoja, in cui l'uso di materiali innovativi biocompatibili e adattivi coesiste con l'utilizzo di tecniche di fabbricazione digitale (Fig. 7).

In particolare in tali opere sono stati utilizzati materiali biopolimerici a memoria di forma a base di carboidrati di origine naturale, quali chitosano, pectina e cellulosa, che ne fanno una delle prime applicazioni di stampa 4D su grande scala² (Fig. 8). La quarta dimensione si manifesta in modo duplice: non solo nella capacità dinamica del materiale che, essendo costituito da biopolimeri a memoria di forma, reagisce a variazioni di umidità cambiando la propria rigidità, ma anche nell'evoluzione del manufatto durante l'intera vita utile dell'installazione; quest'ultima, infatti, è progettata per degradarsi se esposta all'acqua piovana, costituendo una costru-

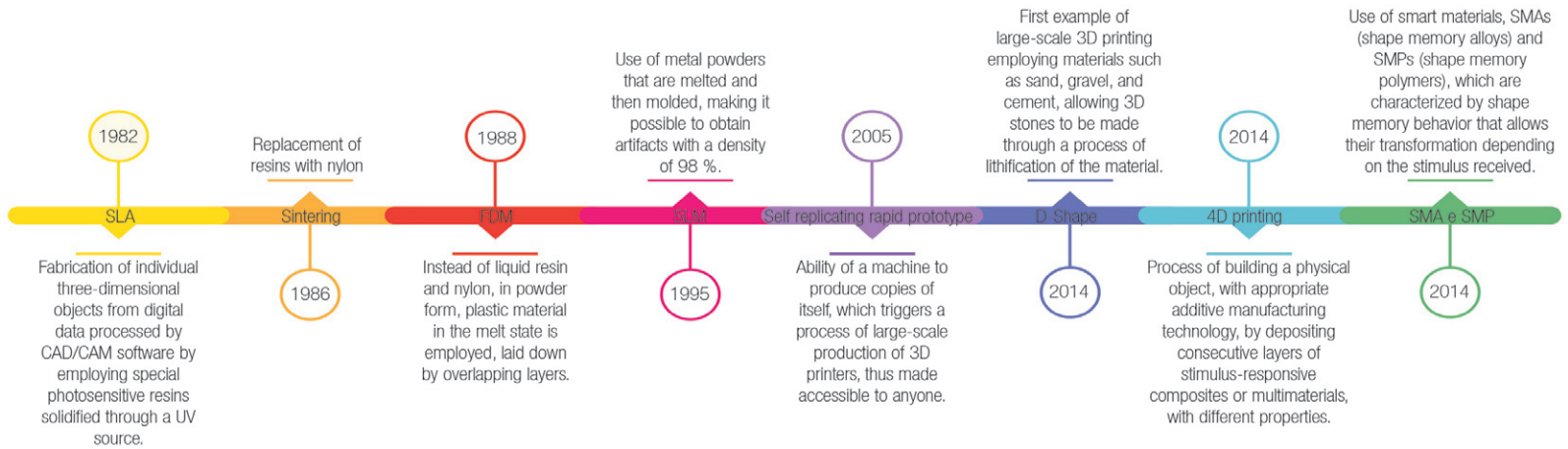


Fig. 2 | Time sequence of the evolution of additive manufacturing techniques (credit: the Authors, 2023).

zione 'vivente' destinata a scomparire una volta terminato l'uso (Tai et alii, 2018).

La capacità di produrre elementi personalizzabili e responsivi, inoltre, ha favorito l'impiego delle tecniche di stampa 4D per la realizzazione di componenti per involucri in grado di adattarsi alla variazione delle condizioni ambientali, ai fini della riduzione del consumo energetico dell'edificio (Alotaibi, 2015; Hosseini, Mohammadi and Guerra-Santini, 2005). Tale campo di applicazione nasce come evoluzione dei tradizionali sistemi di schermatura solare mobili, dove il movimento dei singoli moduli è garantito da meccanismi motorizzati che concorrono ai consumi energetici dell'edificio e che necessitano di una continua opera di manutenzione per il loro corretto funzionamento (Yi et alii, 2020).

La stampa 4D, coniugando manifattura additiva e materiali a memoria di forma, consente la produzione di moduli in grado di attivarsi autonomamente, evitando l'impiego di ulteriori dispositivi meccanici e semplificando così il sistema schermante grazie a una 'intelligenza primitiva' propria del materiale (Perriccioli, Ruggiero and Salka, 2021). Tale ambito è stato caratterizzato, dapprima da sistemi ibridi, le cui tecniche di fabbricazione digitale sono state impiegate congiuntamente a sistemi tradizionali; a riguardo, si segnala l'esperienza di Hwang Yi (2021), che ha proposto una prima applicazione di sistemi misti per la realizzazione di componenti costruttivi adattivi nella regolazione dell'apporto della radiazione solare in ambienti interni.

La suddetta sperimentazione è stata caratterizzata dallo studio e prototipazione di un sistema modulare a base di policarbonato e acido polilattico stampati in 3D che, tramite l'applicazione di elementi realizzati con leghe a memoria di forma termoreattive (T-SMA) e sfruttando forme proprie dell'origami, quali la cosiddetta waterbomb, è in grado di cambiare la propria conformazione adattandosi alle condizioni ambientali (Fig. 9). Il processo può essere considerato ancora un sistema ibrido poiché, per ovviare a eventuali problemi derivanti dall'usura dei materiali, è stato impiegato anche un attuatore motorizzato elettrico, quale dispositivo ausiliario per limitare lo stress nell'elemento a base di SMA, realizzato con una lega nichel-titanio. L'impiego della stampa 4D ha consentito, al termine del processo di produzione, una diretta validazione del sistema mediante realizza-

zione di un mock-up sottoposto a test per simulare il comportamento in opera, verificando rapidamente l'efficacia della soluzione proposta e procedendo a una sua ottimizzazione (Fig. 10).

La predetta attività sperimentale ha rappresentato un punto di partenza per sistemi adattivi caratterizzati da una maggiore complessità, realizzati unicamente da materiali a memoria di forma tramite tecniche di stampa 4D. Al riguardo è paradigmatica l'esperienza di Yi e Kim (2021) che, ispirandosi a elementi naturali quali gli stomi dei cactus, hanno realizzato moduli dinamici per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche di edifici in climi aridi: il singolo elemento nelle ore più calde adotta una conformazione piatta che, schermando il passaggio della radiazione solare, limita il surriscaldamento degli ambienti interni; al contrario, con il progressivo abbassamento della temperatura ambientale, il pannello cambia la propria forma, incurvandosi, e favorisce il passaggio della radiazione solare (Fig. 11).

Per tale esperienza è stato adoperato un modulo composito a memoria di forma, in cui coesistono SMA e SMP. In particolare le fibre di nichel-titanio (SMA) sono state annegate in una matrice a base acrilica e poliuretana (SMP), consentendo una corretta integrazione tra le parti, capace di assicurare un'efficace trasmissione del calore e degli sforzi meccanici tra i due materiali impiegati (Fig. 12). Quest'ultima esperienza testimonia la rapida evoluzione delle tecniche di stampa 4D per la produzione di sistemi complessi modulari totalmente autonomi, ma resta uno dei pochi episodi isolati in quanto le applicazioni su larga scala sono ancora pressoché inesistenti.

Potenzialità e limiti della stampa 4D per le costruzioni | L'analisi delle potenzialità e dei limiti applicativi delle tecniche di stampa 4D per le costruzioni impongono dapprima uno sguardo più ampio sul tema. A testimonianza del sempre maggiore interesse mostrato dai settori manifatturieri per l'argomento, negli ultimi anni il valore del mercato globale della manifattura additiva attraverso stampaggio 4D ha visto una rapida crescita passando da 65 milioni di dollari del 2019 ai 90 milioni del 2021, con una stima per il 2030 pari a oltre 2 miliardi di dollari (Grand View Research, 2018).

L'interesse del settore manifatturiero deriva originariamente dalla possibilità di realizzare rapidamente prodotti in funzione delle specifiche richie-

ste dell'utilizzatore finale, ottenendo un notevole risparmio in termini di energia e materie prime necessarie alla produzione (Leist and Zhou, 2016; Ghi and Rossetti, 2016). Un esempio paradigmatico è rappresentato dall'ambito biomedicale dove le tecniche di stampa 4D hanno consentito una rapida produzione di protesi, stent e tessuti artificiali in grado di adattarsi al corpo del paziente e di raggiungere prestazioni nettamente superiori rispetto ai sistemi tradizionali (Aldawood, 2023).

Le possibili applicazioni della stampa 4D nel settore delle costruzioni, invece, rappresentano un ambito per la fabbricazione digitale ancora parzialmente inesplorato. Dall'analisi dell'attuale stato dell'arte sul tema si possono delineare i principali fattori che hanno favorito la diffusione del suddetto processo (Tab. 2). Tra questi, si evidenzia la possibilità di produrre elementi personalizzabili e programmabili in base alle specifiche condizioni finali di impiego (Vatanparast et alii, 2023), in grado di adattarsi alla variazione dei parametri ambientali (Saritha and Dhatreyi, 2021), garantendo le condizioni di benessere degli utenti (Yi et alii, 2020) e limitando i consumi energetici. Quest'ultimo aspetto, in particolare, è ottenibile tramite l'intelligenza primitiva insita nella materia del componente 4D, senza la necessità di sfruttare l'ausilio di sistemi complementari che andrebbero ad aggravare la posa in opera del sistema.

Inoltre la produzione di componenti auto-assemblanti, unita alla possibilità di discretizzare il manufatto in moduli riproducibili con comuni tecniche di manifattura additiva, velocizza la costruzione del manufatto finale e ne limita i costi di realizzazione (Tibbits, 2014; Leist and Zhou, 2016). Tale processo è ulteriormente ottimizzato grazie all'approccio tipico della fabbricazione digitale, quasi artigianale, in cui l'elemento finale è modellato nel dettaglio in ogni sua parte e in seguito prototipato in base alle specifiche caratteristiche richieste dal suo impiego con una ottimizzazione in corso d'opera, eliminando eventuali sprechi di risorse derivanti da possibili errori progettuali (Kuang et alii, 2018).

L'utilizzo su vasta scala nell'ambito delle costruzioni delle soluzioni realizzate con tecniche di stampaggio 4D, tuttavia, è limitato da diversi fattori (Tab. 2), due dei quali sono individuabili nella mancanza di una piena conoscenza delle prestazioni ottenibili dai componenti costruttivi durante la loro vita utile e la carenza di informazioni sulle

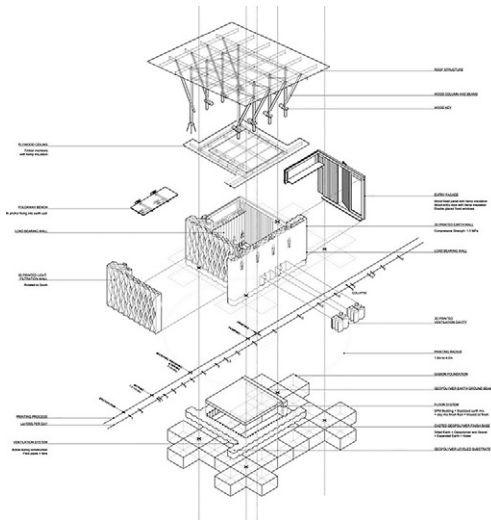


Fig. 3, 4 | DFAB House stands on the upper floor of the NEST building (credit: R. Keller); Digital fabrication techniques employed in the DFAB house (source: Graser, Kahler and Hall, 2021).

Fig. 5 | Axonometric exploded view of the TOVA Pavilion (source: IAAC, 2022).

ricadute economiche dell'impiego di tali sistemi in casi studio reali.

Le applicazioni in ambito architettonico ed edilizio riportate in letteratura sono limitate a teorizzazioni e studi dimostrativi a scala laboratoriale, focalizzati unicamente sul rapporto tra l'elemento e gli stimoli che attivano il meccanismo di reazione; di conseguenza risulta impossibile effettuare una valutazione delle prestazioni tecnologiche e dell'impatto economico di tali sistemi sul lungo termine (Vatanparast et alii, 2023). Tale lacuna è ancor più rilevante nel caso di elementi stampati in 4D in sistemi di involucro edilizio adattivi e re-

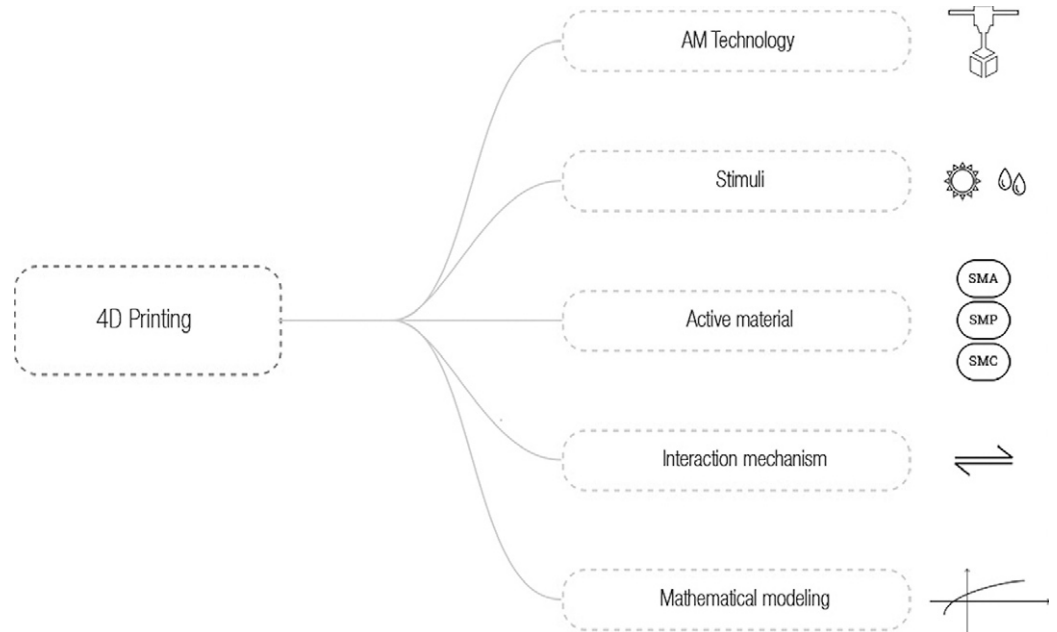


Fig. 6 | Main features of the 4D printing process (credit: the Authors, 2023).

sponsivi, in quanto la presenza degli agenti atmosferici esterni può influenzare l'efficienza dei meccanismi di reazione e minacciare l'integrità del sistema stesso (Yi and Kim, 2021). Infine, un ulteriore fattore limitante è rappresentato dalla forte personalizzazione nella scelta dei materiali a memoria di forma, il cui impiego è legato alla specificità del caso in oggetto, caratteristica che impedisce la costituzione di un database di buone pratiche da consultare e replicare in base ai requisiti del progetto da realizzare (Demoly et alii, 2021).

Conclusioni | Dall'analisi delle principali applicazioni e studi appare evidente come le tecniche di stampa 4D in architettura siano ancora ristrette a un campo prettamente sperimentale; il livello di conoscenza è tuttora limitato a esperienze applicative in sistemi costruttivi complessi (componenti modulari per facciate adattive) o in architetture effimere (le strutture Aguahoja). Di conseguenza un eventuale sviluppo della tecnica può derivare da nuove esperienze sperimentali, riguardanti aspetti non ancora affrontati (ad esempio, la durabilità dei componenti prodotti e la loro effettiva efficacia su sistemi a dimensioni reali) o da applicazioni in altri ambiti tecnologicamente avanzati, che potranno essere proposte anche nel settore delle costruzioni. A riguardo si segnala il contesto aerospaziale dove, per la realizzazione di strutture abitative in ambienti estremi, si stanno testando soluzioni a base di componenti auto assemblanti (Ekblaw, 2022); in tale ambito, quindi, l'impiego di prodotti stampati con tecnica 4D risponde ai requisiti richiesti e può essere considerato una valida alternativa ai sistemi elettromagnetici in uso (Ekblaw and Paradiso, 2019).

Infine nei prossimi anni la tecnica di stampa 4D sarà inevitabilmente rivoluzionata a seguito dell'introduzione di nuovi processi di manifattura additiva; tra questi si segnala l'innovazione tecnologica basata sull'introduzione di una maggiore capacità di movimento dell'ugello di stampa (cinque movimenti contro i tre tradizionali), che consente di depositare strati di materiale curvi più resistenti alle sollecitazioni meccaniche, rendendo

possibile la teorizzazione della cosiddetta stampa 5D (Anas et alii, 2022). In altri settori tecnologicamente avanzati è teorizzata per la prima volta la possibile unione delle suddette tecniche per confluire nell'inedita stampa 6D, in grado di realizzare elementi curvi ad alta resistenza meccanica e in grado di reagire agli stimoli esterni (Nida, Moses and Anandharamakrishnan, 2022). L'auspicio è che tali tecnologie 'sperimentali' possano trovare presto un'applicazione in architettura, colmando il tradizionale ritardo che il settore delle costruzioni registra verso l'innovazione di prodotto e di processo, per contribuire, alle diverse scale del costruito, a limitare l'impatto dell'azione antropica sul nostro pianeta.

The construction sector is a key component of the global economic market (Ghobakhloo, 2020). It is currently estimated to generate an investment volume of USD 9.7 trillion, a value set to increase substantially over the next decade to reach the USD 14 trillion mark by 2037 (Oxford Economics, 2023). Despite being one of the leading domains of the economic system, the construction sector has been only partially affected by the many innovations that have revolutionised the main fields of human activity in recent years (Fig. 1; Oke et alii, 2023). Due to numerous cultural, social and economic barriers, the complete transition to a new evolutionary reality, the so-called Construction 4.0 (El Jazzer et alii, 2020), is still a problematic process that is still in progress. The difficulties in the evolution of the construction sector go hand in hand with the growing sensitivity towards environmental and energy sustainability, which requires a paradigm shift with the adoption of now unavoidable ethical-economic strategies and actions, including judicious use of non-renewable resources, to counteract the effects of climate change (Gallego-Schmid et alii, 2020) and the fallout caused by recent war events (Hryhorovskiy et alii, 2022).

Against this backdrop, it is possible to identify numerous research trends affecting the construc-

Family	Name	Stimulus type	Material performance	Application field	Reference
T-SMA	Ni-Ti binary alloys	Temperature	High actuation strains, large, generated forces, high corrosion resistance	Biomedical	Kim et alii, 2023
T-SMA	Ni-Ti-based ternary alloys	Temperature	High actuation strains, large, generated forces, high corrosion resistance	Biomedical	Kim et alii, 2023
T-SMA	Cu-based alloys	Temperature	Less temperature hysteresis, better machinability, lower cost	Automobiles	Al-Humairi, 2019
M-SMA	Ni-Mn-Ga	Magnetic field	Quick response to the stimulus, energy efficiency	Aerospace, automotive, mobile robots	Kim et alii, 2023
M-SMA	Fe-Pd	Magnetic field	Quick response to the stimulus, energy efficiency	Aerospace, automotive, mobile robots	Kim et alii, 2023
M-SMA	Fe-Pt	Magnetic field	Quick response to the stimulus, energy efficiency	Aerospace, automotive, mobile robots	Kim et alii, 2023
SMP	PNB, PCL, SBR	Temperature	Great thermo-responsive shape-memory efficiency	Biomedical sensitive applications (e.g. stent)	Ansari et alii, 2018
SMP	β -CD-DETA, Polyurethanes	PH	Safety in medical applications	Biomedical applications	Strzelec, Sienkiewicz and Szmeczyk, 2020
SMP	Ether-based polyurethane, Poly(vinyl alcohol)	Water	No need to apply heat to obtain shape-memory conversion	Soft robots, micro-generators, smart building materials, textiles	Zhang et alii, 2022
SMP	Iron oxide (Fe ₃ O ₄)+SMP micro-sized Ni powder magnetite + poly(butyl acrylate) magnetite + polylactide magnetite + polycaprolactone	Magnetic field	Giant deformational effects, high elasticity, anisotropic elastic and swelling properties, quick response to magnetic fields, real-time controllable elastic properties	Sensor, transducer	Filipcsei et alii, 2007
SMP	boron nitride and carbon nanotube + epoxy-based SMP gold nanorods (AuNRs) into a poly(ϵ -caprolactone) matrix	Light	Low-costs light sources	Optical, photo-switchable electronic devices, dynamic photonic devices and photonic circuits, self-healing materials	Li, Schenning and Bunning, 2019

Tab. 1 | Main shape memory materials used for 4D printing (credit: the Authors, 2023).

tion process, particularly digitisation and the end product, with the emergence of all-new high-performance technical solutions (Ribeirinho et alii, 2020). In recent years, the way construction components are produced has changed, combining mass standardisation with customised production aimed at specific usage needs (Pasco, Lei and Aranas, 2022). This evolution has been made possible thanks to digital production technologies and new professional figures with transdisciplinary skills (Canestrino, 2021), also driven by the desire to achieve a new form of society centred on self-production (Russo and Moretti, 2020) – a production mode that is accessible to all, easily replicable and low-cost (Pone, 2022).

In the field of construction, among the technologies used in digital fabrication that have evolved

significantly in recent years is additive manufacturing (Li et alii, 2020; Fig. 2). This development has been possible both thanks to the progressive increase in the size of the printed element, which has allowed even the 'production' of entire houses (Sposito and Scalisi, 2017), and through the use of innovative, high-performance materials capable of responding to increasingly pressing environmental issues. Relevant examples are Italcementi's experiments on using cementitious composites for 3D printing or the Italian WASP with the return to natural materials such as raw earth and vegetable fibres (Di Dio et alii, 2022).

At the same time, building material sciences have been conducting research intending to impart an unprecedented dynamism to building components, giving the external envelope the skill to

adapt and be responsive to external stresses (Jang, Lee and Kim, 2013). To overcome the need to employ sensors and actuators, we have addressed nanoscale material design, creating a new category called 'smart materials' (Clifford et alii, 2017). Additive manufacturing has employed such materials for the production of modular elements inspired by the natural world (Paoletti, 2017; Tucci, 2017), and it has recently characterised them with a fourth dimension (4D) to employ them as dynamic and adaptive building elements through a customer-based approach (Haleem et alii, 2021). In this way, it is possible to obtain complex building components optimised for the particular conditions of use, capable of adapting to continuous environmental changes and with a high level of performance.

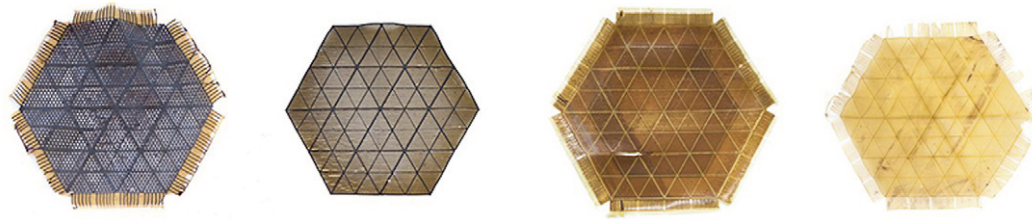


Fig. 7 | Shape memory biopolymer modules (credit: Mediated Matter Lab, 2019).

Fig. 8 | Example of a structure realised within the Aguahoja projects (credit: N. Oxman and Mediated Matter Lab, 2019).

Despite its enormous potential in the field of construction, 4D printing is today mainly used in more technologically advanced sectors, such as biomedical engineering (Agarwal et alii, 2021). Among the various limitations of a 4D application in the construction sector is the incompatibility between production techniques and the application scale. To overcome these limits, the concept of the module, understood as an elementary unit of a whole, repeatable and reproducible, plays a fundamental role: the characteristics of flexibility, adaptability, ease of transport and assembly inherent to the discretisation of construction elements into modular components, make it possible to overcome the limits of scalability that are still present (Minunno et alii, 2020).

However, despite a growing interest in the application of additive manufacturing techniques in the construction sector, the topic of the relationship between modularisation and 4D printing is still scarcely addressed in the literature, and the gradual transition between 3D building production and the use of 4D technology in modular constructions is only marginally analysed.

With this essay, the authors wish to contribute to the current debate on the application of digital fabrication techniques in architecture, analysing the relationship between modularisation in additive manufacturing processes and 4D printing in the construction sector, with a view to the progres-

sive clearance of these solutions for the realisation of adaptive and responsive buildings. To achieve the aim mentioned above, this essay first analyses the main research trends in the use of modular elements produced with additive manufacturing, then focuses on the main peculiarities of the 4D printing process and, lastly, examines the main factors that have facilitated or limited its use in the construction sector. This examination takes place through an analysis of the first 4D printing applications in architecture and construction, outlining possible future developments.

In particular, this work examines specific case studies that represent emblematic examples of how the process of modularisation allows the application of techniques typical of additive manufacturing in the field of construction and enables the introduction of the time element as a design parameter, overcoming the traditional static nature of the construction work. The aim is to establish a knowledge base for future research activities on the possible applications of modular systems realised by employing 4D printing, which can be used to realise adaptive building envelopes.

The module for digital fabrication in construction

Since the end of the first decade of the 21st century, there has been a progressive leap in the scale of the printed object, with the appearance of the first examples of dwellings made through digital fabrication techniques (Sposito and Scalisì, 2017), including those produced with an axial controlled extrusion process or with contour crafting, which consists of the distribution by layers of cement mixtures. Within a short period, starting from its presentation in 2009 at the University of Southern California, the latter technique has rapidly spread in the construction sector, enabling the construction of entire buildings (Paolini, Kollmannsberger and Rank, 2019).

The main limitations of these early applications can be traced back to the poor scalability of the process, as the size of the realisable artefact depends on the range of the available equipment (Hager, Golonka and Putanowicz, 2016). Furthermore, the type of material used is often characterised by a highly impactful production cycle, in contrast to the now unavoidable demands for environmental sustainability (Heywood and Nicholas, 2023).

To cope with the first highlighted problem, the first experiments aimed at reducing the scale of printing equipment appeared. This included the first experiences using small-scale robotic operators who, following the discretisation of the work in modules, proceed in parallel with the construction of the building. These techniques have numerous advantages over traditional printing, including, for example, greater mobility, manoeuvrability and freedom in the choice of materials to be used since, with 'diffuse' construction, the dimensional and operational limitations of traditional printing equip-

ment are overcome. At the same time, one of the main limitations of this approach is that only vertical structures can be realised, whereas, for horizontal elements, piecemeal production and subsequent assembly must be adopted (Dörfler et alii, 2022).

The discretisation of the building into modules, to be realised in parallel, is also the basis of the experience that led to the construction of the DFAB House, developed and acknowledged by ETH Zurich. This construction constitutes one of the first examples of a habitable building realised solely employing digital fabrication techniques (Graser, Kahlert and Hall, 2021), and it is located within a structure called NEST (Fig. 3), where each individual housing unit constitutes an experimental habitable module, which is subject to compliance with local building regulations. The DFAB House, in particular, constitutes the portion of the building located on the building's top floor. Its realisation saw the combination of various digital fabrication techniques, and the bonding agent was the discretisation of the construction elements into modular components made on-site or at the project's partner companies (Graser, Kahlert and Hall, 2021; Fig. 4).

The concept of modularisation of the work to be realised is also present in research experiences related to additive manufacturing techniques focused on using sustainable materials. Among the latter are experiments using raw earth-based mixtures, natural elements characterised by a low environmental impact (Sposito and Scalisì, 2019). In this field of research, it is worth mentioning the work of the IAAC in Barcelona in collaboration with WASP, which in 2022 led to the realisation of TOVA, the first Spanish building to be entirely 3D printed using a mixture of earth, aloe, egg white and enzymes (Fig. 5). The experience gained by WASP in other previous projects, such as Gaia and Itaca, enabled the realisation of modular wall elements printed with material recovered less than 50 metres from the construction site, using the Crane printing technique (IAAC, 2022).

Although representative of the evolution of additive manufacturing techniques in the construction field, the aforementioned experimental experiences are still linked to methodologies typical of a static type of traditional architecture and are incapable of adapting to changing environmental conditions; in this regard, the desire to give dynamism to the manufactured product has favoured the development of 4D production techniques, thus introducing the temporal dimension.

4D printing as the last frontier of additive manufacturing

Although digital manufacturing is a process that dates back to the late 20th century, 4D printing was first theorised only in 2014. It was defined as an additive manufacturing technique that enables the production of elements that can change their shape or structure when subjected to external stimuli (Tibbitts, 2014). This first definition, introduced by researchers at MIT in Boston, included only components characterised by a dynamism of form. Still later on, other authors also had further types of reactions in this category, such as the variation of optical properties (Pei, 2014).

Compared to traditional 3D techniques, the innovation in this field lies in the material used, which is capable of reacting to external stimuli and

is therefore defined as smart (Addington and Schoedek, 2005). In particular, the innovative aspect lies in the reaction mechanism that is inherent in the material, without any deterioration of the material itself (Rastogi and Kandasubramanian, 2019), and that operates autonomously, thus making it possible to obtain elements defined as self-assembling (Khoo et alii, 2015).

An analysis of application experiences shows that the 4D printing process is characterised by the following steps (Fig. 6): the mathematical model design of the element, selection of the digital fabrication technique, selection of the smart material and, lastly, verification of the reaction mechanism (Momeni et alii, 2017). While 3D printing production techniques (Pei, Loh and Nam, 2020), such as Fused Deposition Modelling (FDM) or Fused Filament Modelling (FFM)¹, are used to manufacture the component, what characterises the illustrated process is the crucial role played by the design and material selection phases; only through rigorous mathematical modelling, it is possible to obtain the exact morphology of the component such as to trigger the adaptation processes to changing environmental conditions.

The choice of the smart material to be used determines the susceptibility to certain stimuli and the resulting reaction mechanism. Shape memory elements based on metal alloys (Shape Memory Alloys – SMA) or polymers (Shape Memory Polymers – SMP) are mainly used, as shown in Table 1. The alloys respond to electromagnetic or temperature change stimuli, and the most widely used in the construction industry, such as sensors and actuators, are based on Nickel-Titanium (Fiorito et alii, 2016; Kim et alii, 2023). Shape memory polymers are characterised by a high ductility of use that allows them to be used in composite or programmable structures, in which multiple shapes can be obtained as environmental conditions change (Ahmed et alii, 2021). Based on the reaction mechanism, SMPs can be distinguished into heat-responsive or Thermo-reactive (Ansari et alii, 2018), light-responsive or photoreactive (Li, Schenning and Bunning, 2019), magnetic energy (Filipcsei et alii, 2007) or water-responsive (Zhang et alii, 2022) materials.

The current applications of 4D printing are, however, limited to those technological sectors (robotics, aerospace, biomedical, etc.) that are more prone to experimenting with new techniques and where the use of shape memory materials is well-established (Strzelec, Sienkiewicz and Szmecnyk, 2020). In these fields, the introduction of 4D technology has allowed a further evolution of the technological level, favouring the use of customised solutions capable of adapting to multiple operation conditions. In recent years, these peculiarities have also been exploited in the construction field, becoming part of the broader process of transferring innovation from technologically advanced sectors to the construction industry, as was the case in the past for other cutting-edge solutions (Miodownik, 2015).

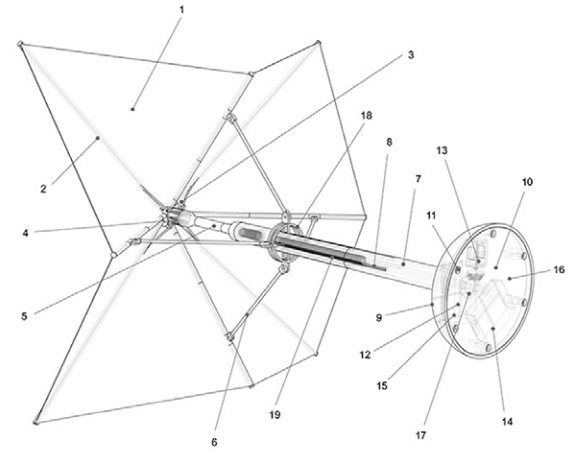
The module in 4D constructions | 4D printing has always been closely linked to the module con-

■ Parts

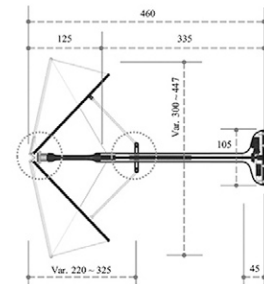
NO	Part descriptions	Dimensions (mm)
1	Origami panel (8ea)	W219XH219Xt 0.8
2	Panel hinge (8ea)	∅5.1Xt0.8
3	Panel joint (4ea)	L18.7X∅2.3Xt 2.0
4	Joint constraints (8ea)	L20XW8X∅2.3Xt 2.0
5	Panel fixing head (1ea)	L157X∅;20.0X∅;8.6
6	Driving arm (4ea)	L230XW2XH4X∅2.3
7	Body part (1ea)	L290X∅20.0Xt2.65
8	Slider slit (slit, 4ea)	L267XW3.0
9	Gear box cap (1ea)	∅113XH45Xt2.65
10	Back cover plate (1ea)	∅107Xt5.0
11	Screw groove (1ea)	∅;6Xt;2.5X∅;6Xt;2.5
12	Wi-Fi Micro controller (1ea)	ESP8266 Node MCU
13	Micro geared DC motor (1ea)	3V SZH-GNP104
14	Li-Po battery (1ea)	1300mAh TW103440
15	Motor-driver module (1ea)	1.5A/SZH-MDBL-010
16	Sensor (1ea)	DHT sensor
17	Bevel gear (1ea)	∅19.5, pitch 4.2
18	Ring (1ea)	∅;1.40X∅;2.13Xt2.0
19	Bevel gear worm (1ea)	∅9.2XL125, pitch 2.4

Note. L: length, t: thickness, ∅: Diameter, W: Width, H: Height, d: depth

Parts technical specifications



3D configuration



Longitudinal section

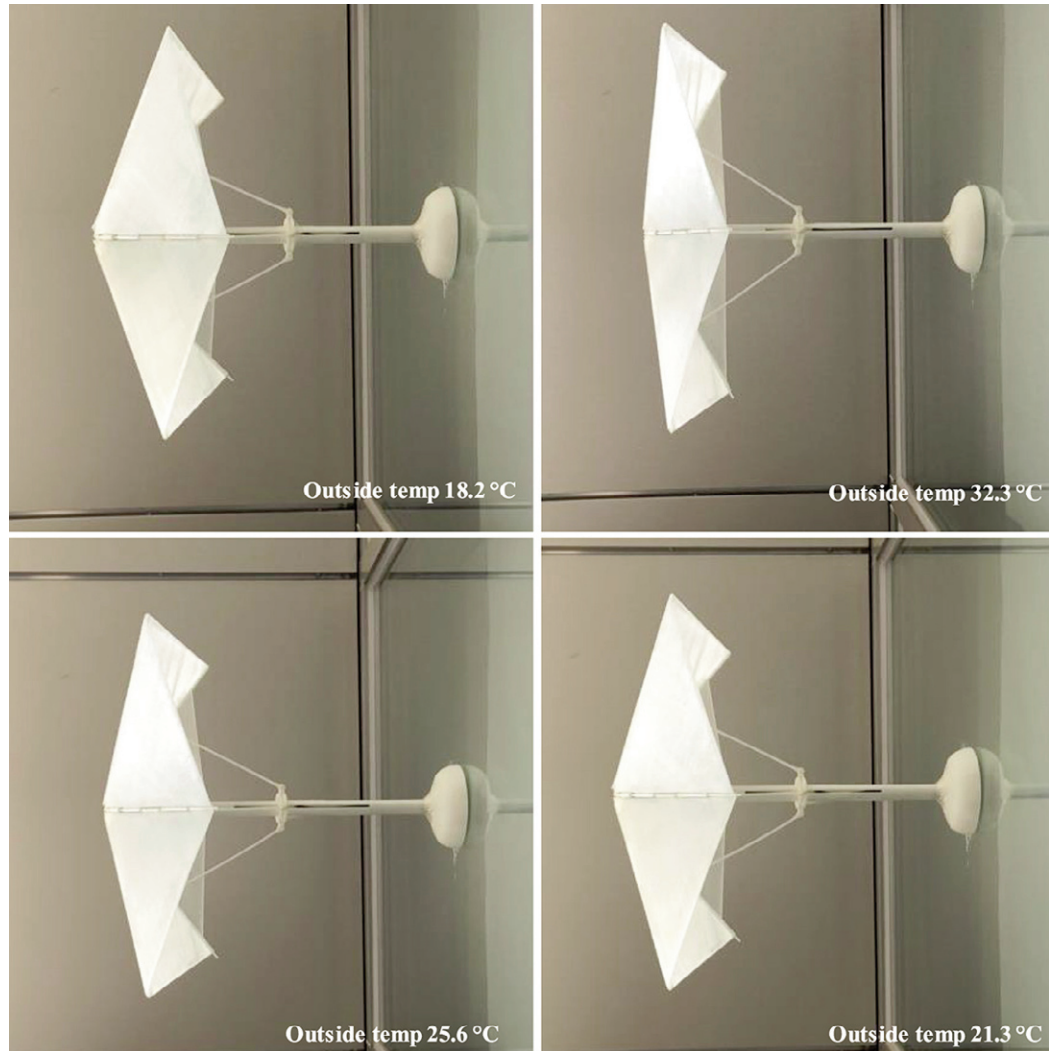


Fig. 9, 10 | SMA-based module design and experimental evaluation of shape change with temperature variation (source: Yi et alii, 2020; adapted by the Authors, 2023).

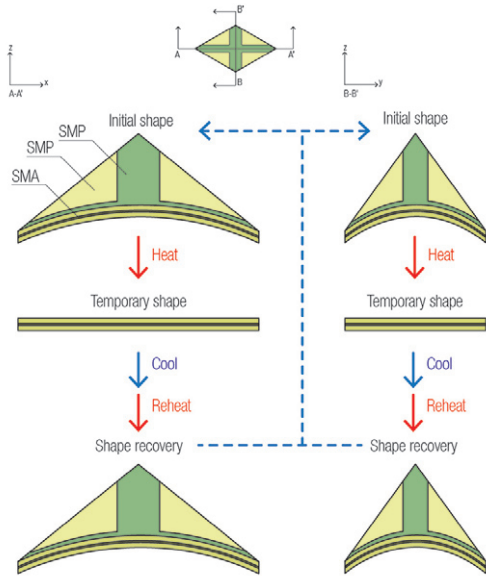
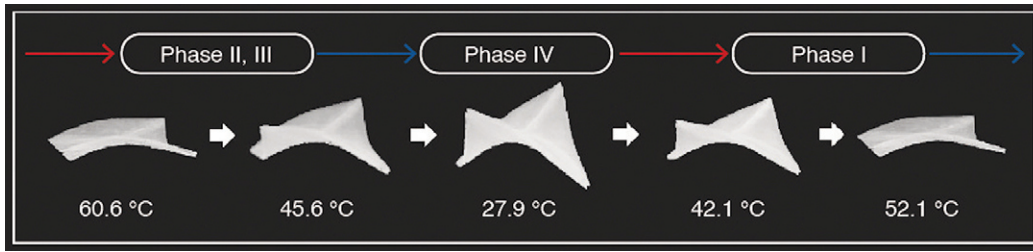


Fig. 11, 12 | Temperature-adaptive module configurations and SMP-SMA-based dynamic panel composition (source: Yi and Kim, 2021; adapted by the Authors, 2023).

cept since the first experiments. Even before introducing the concept in 2014 as a production technique based on the digital fabrication of self-assembling elements (Tibbits, 2014), Tibbits himself theorised in 2012 about the possibility of discretising architectures into modular elements capable of autonomously composing complex structures (Tibbits and Cheung, 2012). In addition to conceptualising new possible construction techniques that would lead to savings in terms of construction time and cost, this theorisation introduces the concept of ‘living material’, where the individual building component grows by evolving from its production.

The idea of living modular elements has been the basis of several research programs, including the Engineered Living Materials (ELM), launched in 2016 by the US government’s Defense Advanced Research Project Agency (DARPA, 2016) and aimed at the realisation of digitally fabricated materials of natural origin, capable of self-repairing and adapting to changing environmental conditions.

In the context mentioned above is the first pioneering work of the Mediated Matter Lab at MIT aimed at the production of dynamic modular elements employing bio-moulding techniques (Smith et alii, 2020); the latter are used for the realisation of tower structures called Aguahoja, in which the use of innovative biocompatible and adaptive materials coexists with the use of digital fabrication techniques (Fig. 7).

In particular, shape memory biopolymer materials based on carbohydrates of natural origin, such as chitosan, pectin and cellulose, were used

in these works, making them one of the first large-scale 4D printing applications² (Fig. 8). The fourth dimension manifests itself in two ways: not only in the dynamic capacity of the material, which, being made of shape memory biopolymers, reacts to changes in humidity by changing its stiffness, but also in the evolution of the artefact during the entire life of the installation. The latter is designed to degrade when exposed to rainwater, constituting a ‘living’ construction destined to disappear once its use is over (Tai et alii, 2018).

The ability to produce customisable and responsive elements has also favoured the use of 4D printing techniques for the realisation of envelope components capable of adapting to changing environmental conditions to reduce the building’s energy consumption (Alotaibi, 2015; Hosseini, Mohammadi and Guerra-Santin, 2005). This field of application was born as an evolution of traditional mobile solar shading systems, where the movement of individual modules is guaranteed by motorised mechanisms that contribute to the building’s energy consumption and require continuous maintenance for their proper functioning (Yi et alii, 2020).

By combining additive manufacturing and shape memory materials, 4D printing allows the production of modules capable of autonomous activation, avoiding the use of additional mechanical devices and thus simplifying the shielding system thanks to a ‘primitive intelligence’ inherent to the material (Perriccioli, Ruggiero and Salka, 2021). This field was first characterised by hybrid systems, whose digital fabrication techniques were employed with traditional systems. In this regard, it is worth mentioning the experience of Hwang Yi (2021), who proposed a first application of mixed systems to realise adaptive building components for regulating solar radiation intake in indoor environments.

The experimentation mentioned above was characterised by the study and prototyping of a modular system based on 3D-printed polycarbonate and polylactic acid, which can change its conformation by adapting to environmental conditions (Fig. 9) through the application of elements made of Thermo-reactive Shape Memory Alloys (T-SMA) and by exploiting origami-like shapes, such as the so-called waterbomb. The process can still be regarded as a hybrid system since an electric motorised actuator was also used as an auxiliary device to limit the stress in the SMA-based element, made from a Nickel-Titanium alloy, to overcome any problems arising from material wear. At the end of the production process, 4D printing allowed a direct validation of the system by creating a mock-up subjected to tests to simulate its behaviour in situ, quickly verifying the effectiveness of the proposed solution and proceeding to its optimisation (Fig. 10).

The aforementioned experimental work represented a starting point for adaptive systems characterised by greater complexity, realised solely from shape memory materials employing 4D printing techniques. In this regard, the experience of Yi and Kim (2021) is paradigmatic. Inspired by natural elements such as the stomata of cacti, they have realised dynamic modules for optimising the energy performance of buildings in arid climates: during the hottest hours, the single element adopts a flat shape that shields the passage of solar radiation, limiting the overheating of the interior spaces; on the contrary, as the ambient temperature gradually drops, the panel changes its shape, curving, and favouring the passage of solar radiation (Fig. 11).

In this experience, a shape memory composite module was used, in which SMA and SMP coexist. In particular, the Nickel-Titanium fibres (SMA) were embedded in an acrylic and polyurethane-based matrix (SMP), allowing for a correct integration between the parts, capable of ensuring effective transmission of heat and mechanical stresses between the two materials used (Fig. 12). This last experience testifies to the rapid evolution of 4D printing techniques for the production of complex modular fully autonomous systems, but remains one of the few isolated episodes as large-scale applications are still almost non-existent.

Potentialities and limits of 4D printing for construction | Analysing the potential and application limits of 4D printing techniques for construction first requires a broader look at the topic. Testifying to the increasing interest shown by manufacturing sectors in the topic, the value of the global market for additive manufacturing through 4D printing has seen rapid growth in recent years, rising from USD 65 million in 2019 to USD 90 million in 2021, with an estimate for 2030 of more than USD 2 billion (Grand View Research, 2018).

The interest in the manufacturing sector originally stems from the possibility of rapidly producing products according to the end-users’ specific requirements, achieving significant savings in energy and raw materials needed for production (Leist and Zhou, 2016; Ghi and Rossetti, 2016). A paradigmatic example is the biomedical field, where 4D printing techniques have rapidly produced prostheses, stents and artificial tissues capable of adapting to the patient’s body and achieving significantly higher performance than traditional systems (Aldawood, 2023).

On the other hand, the possible applications of 4D printing in the construction sector represent a still partially unexplored field for digital fabrication. An analysis of the current state of the art on the subject reveals the main factors that have favoured the spread of this process (Tab. 2). These include the possibility of producing elements that can be customised and programmed according to the specific final conditions of use (Vatanparast et alii, 2023), capable of adapting to varying environmental parameters (Saritha and Dhatreyi, 2021), guaranteeing the well-being of users (Yi et alii, 2020) and limiting energy consumption. The latter aspect, in particular, is achievable through the primitive intelligence inherent in the 4D component’s matter, without the need to take advantage of complementary systems that would aggravate the system’s installation.

Moreover, coupled with the possibility of discretising the artefact into reproducible modules using standard additive manufacturing techniques, the production of self-assembling components speeds up the construction of the final artefact and limits its manufacturing costs (Tibbits, 2014; Leist and Zhou, 2016). This process is further optimised through the typical digital fabrication, quasi-craftsmanship approach, in which the final element is modelled in detail in every part and subsequently prototyped according to the specific characteristics required by its use with an in-process optimisation, eliminating any waste of resources resulting from possible design errors (Kuang et alii, 2018). The large-scale use of 4D moulding solutions in construction is, however, limited by several factors (Tab. 2), two of which are the lack of complete knowledge of the performance that construction components can achieve during their service life and the lack of information on the economic effects of using these systems in real case studies.

The applications in architecture and construction reported in the literature are limited to theorisations and demonstration studies on a laboratory scale, focused solely on the relationship between the element and the stimuli that activate the reaction mechanism. Consequently, it is impossible to assess the technological performance and economic impact of such systems in the long term (Vatanparast et alii, 2023). This shortcoming is even more relevant in the case of 4D-printed elements

in adaptive and responsive building envelope systems, as the external weathering may affect the reaction mechanisms' efficiency and threaten the system's integrity (Yi and Kim, 2021). Finally, a further limiting factor is the robust customisation in the choice of shape memory materials, which is linked to the specificity of the case in question. This characteristic prevents the constitution of a database of good practices from being consulted and replicated according to the project's requirements to be realised (Demoly et alii, 2021).

Conclusions | From the analysis of the main applications and studies, it is evident that 4D printing techniques in architecture are still restricted to a purely experimental field. The knowledge level is still limited to application experiences in complex building systems (modular components for adaptive façades) or ephemeral architectures (the Aguahoja structures). Consequently, a possible development of the technique may derive from new experimental experiences concerning aspects that have not yet been addressed (e.g. the durability of the components produced and their actual effectiveness on full-size systems) or from applications in other technologically advanced fields, which may also be proposed in the construction sector. In this regard, it is worth mentioning the aerospace context, where solutions based on self-assembling components are being tested for realising housing structures in extreme environments (Ekblaw, 2022). In this context, using

4D-printed products fulfils the requirements and can be considered a viable alternative to electromagnetic systems (Ekblaw and Paradiso, 2019).

Finally, 4D printing technology will inevitably be revolutionised in the coming years by introducing new additive manufacturing processes. Among these is the technological innovation based on the introduction of a greater movement capacity of the printing nozzle (five movements as opposed to the traditional three), which allows curved layers of material to be deposited that are more resistant to mechanical stress, making the theorisation of so-called 5D printing possible (Anas et alii, 2022). In other technologically advanced fields, it is theorised for the first time that the techniques mentioned above can be combined to form unprecedented 6D printing, which is capable of producing curved elements with high mechanical resistance and capable of reacting to external stimuli (Nida, Moses and Anandharamakrishnan, 2022). The hope is that these 'experimental' technologies may soon find an application in architecture, bridging the construction sector's traditional lag towards product and process innovation to contribute, at the various scales of the built environment, to limiting the impact of anthropic action on our planet.

Pros and cons	Typology	Key features	References
Pros	Building performance	Flexibly deformable, lightweight and sustainable kinetic building	Yi, 2021
Pros	Building performance	Improved building performance in terms of temperature control	Yi et alii, 2020
Pros	Building performance	Environmental flexibility	Saritha and Dhatreyi, 2021
Pros	Construction phase	Solving problems related to the use of motorized mechanisms (noise, energy consumption, frequent maintenance)	Leist and Zhou, 2016
Pros	Construction phase	Resource savings and reduced waste through design and management control tools that optimize manufacturing process accuracy	Saritha and Dhatreyi, 2021
Pros	Building performance	Programmable properties according to needs and environmental conditions	Vatanparast et alii, 2023
Cons	Building performance	Possible need for dual power supply (4D and electric motor)	Yi et alii, 2020
Cons	Building performance	Data still partial and incomplete, research limited to laboratory size, lack of in situ experimentation	Vatanparast et alii, 2023
Cons	Construction phase	Unknown economic feasibility on site	Yi and Kim, 2021
Cons	Construction phase	Unknown degradation time of smart material effect, need to do long-term analysis	Leist and Zhou, 2016
Cons	Building performance	Unknown resistance of the system to high environmental loads and accuracy of the shape change mechanism	Yi and Kim, 2021

Tab. 2 | Main limitations and potential of using 4D printing in the construction industry (credit: the Authors, 2023).

Acknowledgements

This paper is the result of a joint reflection of the authors. Notwithstanding this, the introductory paragraph, and the following ‘The module for digital fabrication in construction’, ‘4D printing as the last frontier of additive manufacturing’, ‘The module in 4D constructions’, ‘Potentialities and limits of 4D printing for construction’, ‘Conclusions’ are to be attributed to C. Battaglia and S. Polverino. R. Morbiducci coordinated and revised the final draft of the text.

Salvatore Polverino would like to thank the Italian National Operational Programme (PON) ‘Research and Innovation 2014-2020’ – Action IV.6 ‘Research Contracts on Green topics’ as RTD-A (Italian DM 1062/2021, CUP D31B21008360007 – project ‘Constructive systems based on two-dimensional materials for efficient and resilient behaviour of buildings’ SC 08/C1, SSD ICAR/10) at the Department of Architecture and Design, University of Genoa.

Notes

1) Fused Deposition Modelling (FDM), also known as Fused Filament Modelling (FFM), was developed at the end of the 1980s. This methodology works on an additive principle by deposition of superimposed layers. A filament of thermoplastic material (Nylon, ABS, PLA, PVA, PC, PETG) is unwound from a spool and then passed through an extrusion nozzle. The nozzle is heated to melt the material and can be guided in horizontal and vertical directions by a numerically controlled mechanism. Some machines allow composite materials to be moulded by depositing continuous carbon, glass or Kevlar fibres with the thermoplastic polymer.

2) The structures of the Aguahoja series, made of a biopolymer material based on water-reactive hydrogel, form 5-metre-high tower installations.

References

Addington, M. and Schodek, D. (2005), *Smart Materials and New Technologies – For the Architecture and Design Professions*, Architectural Press, Boston. [Online] Available at: bintian.files.wordpress.com/2013/01/smart-materials-new-technologies-for-the-architecture-design-professions.pdf [Accessed 16 October 2023].

Agarwal, T., Hann, S. Y., Chiesa, I., Cui, H., Celikkin, N., Micalizzi, S., Barbetta, A., Costantini, M., Esworthy, T., Zhang, L. G., De Maria, C. and Maiti, T. K. (2021), “4D printing in biomedical applications – Emerging trends and technologies”, in *Journal of Materials Chemistry B*, vol. 9, issue 37, pp. 7608-7632. [Online] Available at: doi.org/10.1039/D1TB01335A [Accessed 16 October 2023].

Ahmed, A., Arya, S., Gupta, V., Furukawa, H. and Khosla, A. (2021), “4D printing – Fundamentals, materials, applications and challenges”, in *Polymer*, vol. 228, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123926 [Accessed 16 October 2023].

Al-Humairi, S. N. S. (2019), “Cu-Based Shape Memory Alloys – Modified Structures and Their Related Properties”, in Al-Naib, U. M. B. (ed.), *Recent Advancements in the Metallurgical Engineering and Electrodeposition*, IntechOpen, pp. 1-30. [Online] Available at: doi.org/10.5772/intechopen.86193 [Accessed 22 October 2023].

Aldawood, F. K. (2023), “A Comprehensive Review of 4D Printing – State of the Arts, Opportunities, and Challenges”, in *Actuators*, vol. 12, issue 3, article 101, pp. 1-31. [Online] Available at: doi.org/10.3390/act12030101 [Accessed 22 October 2023].

Alotaibi, F. (2015), “The role of kinetic envelopes to improve energy performance in buildings”, in *Journal of Architectural Engineering Technology*, vol. 4, issue 3, pp. 149-153. [Online] Available at: doi.org/10.4172/2168-9717.1000149 [Accessed 16 October 2023].

Anas, S., Khan, M. Y., Rafey, M. and Faheem, K. (2022), “Concept of 5D printing technology and its applicability in the healthcare industry”, in *Materials Today | Proceedings*, vol. 56, part 4, pp. 1726-1732. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.391 [Accessed 16 October 2023].

10.1016/j.matpr.2021.10.391 [Accessed 16 October 2023].

Ansari, M., Golzar, M., Baghani, M. and Soleimani, M. (2018), “Shape memory characterization of poly(ϵ -caprolactone) (PCL)/polyurethane (PU) in combined torsion-tension loading with potential applications in cardiovascular stent”, in *Polymer Testing*, vol. 68, pp. 424-432. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.04.032 [Accessed 16 October 2023].

Canestrino, G. (2021), “Dialettica analogico-digitale nel progetto di architettura – Per rinnovate ipotesi di metodo | Analogue-digital dialectics in architectural design – Towards renewed hypotheses of method”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 56-67. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1052021 [Accessed 16 October 2023].

Clifford, D. T., Zupan, R. J., Brigham, J. C., Beblow, R. V., Whittock, M. and Davis, N. (2017), “Application of the dynamic characteristics of shape-memory polymers to climate adaptive building facades”, in *Proceedings of the 12th Conference of Advanced Building Skins, 2-3 October 2017, Bern, Switzerland*, pp. 171-178. [Online] Available at: durham-repository.worktribe.com/output/1146351 [Accessed 16 October 2023].

DARPA (2016), “Living Structural Materials Could Open New Horizons for Engineers and Architects”, in *darpa.mil*, 08/05/2016. [Online] Available at: darpa.mil/news-events/2016-08-05 [Accessed 16 October 2023].

Demoly, F., Dunn, M. L., Wood, K. L., Qi, H. J. and Andre, J. C. (2021), “The status, barriers, challenges, and future in design for 4D printing”, in *Materials & Design*, vol. 212, article 110193, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110193 [Accessed 16 October 2023].

Di Dio, S., Inzerillo, B., Monterosso, F. and Russo, D. (2022), “Design e transizione digitale – Nuove sfide design-driven per l’innovazione tecno-sociale | Design and digital transition – New design-driven challenges for techno-social innovation”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 212-225. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12192022 [Accessed 16 October 2023].

Dörfler, K., Dielemans, G., Lachmayer, L., Recker, T., Raatz, A., Lowke, D. and Gerke, M. (2022), “Additive Manufacturing using mobile robots – Opportunities and challenges for building construction”, in *Cement and Concrete Research*, vol. 158, article 106772, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106772 [Accessed 16 October 2023].

Ekblaw, A. (2022), “Space Architecture in Microgravity – TESSERAE Project for Large Scale Space Structures”, in *Technology | Architecture + Design*, vol. 6, issue 2, pp. 146-148. [Online] Available at: doi.org/10.1080/24751448.2022.2116225 [Accessed 16 October 2023].

Ekblaw, A. and Paradiso, J. (2019), “Self-Assembling Space Habitats – TESSERAE design and mission architecture”, in *2019 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1109/AERO.2019.8742122 [Accessed 16 October 2023].

El Jazzer, M., Urban, H., Schranz, C. and Nassereddine, H. (2020), “Construction 4.0 – A Roadmap to Shaping the Future of Construction”, in Tateyama, T., Ishii, K. and Inoue, F. (eds), *Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020), Kitakyushu, Japan, October 27-28, 2020*, International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), pp. 1314-1321. [Online] Available at: doi.org/10.22260/ISARC2020/0180 [Accessed 16 October 2023].

Filipceci, G., Csetneki, I., Szilágyi, A. and Zrinyi, M. (2007), “Magnetic Field-Responsive Smart Polymer Composites”, in Gong, B., Sanford, A. R. and Ferguson, J. S. (eds), *Oligomers – Polymer Composites – Molecular Imprinting*, Advances in Polymer Science series, vol. 206, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 137-180. [Online] Available at: doi.org/10.1007/12_2006_104 [Accessed 16 October 2023].

Fiorito, F., Sauchelli, M., Arroyo, D., Pesenti, M., Imperadori, M., Masera, G. and Ranzi, G. (2016), “Shape morphing solar shadings – A review”, in *Renewable and Sustain-*

able Energy Reviews, vol. 55, pp. 863-884. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.086 [Accessed 16 October 2023].

Gallego-Schmid, A., Chen, H.-M., Sharmina, M. and Mendoza, J. M. F. (2020), “Links between circular economy and climate change mitigation in the built environment”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 260, article 121115, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121115 [Accessed 16 October 2023].

Ghi, A. and Rossetti, F. (2016), “4D Printing – An Emerging Technology in Manufacturing?”, in Caporarello, L., Cesaroni, F., Giesecke, R. and Missikoff, M. (eds), *Digitally Supported Innovation*, Lecture Notes in Information Systems and Organisation, vol. 18, Springer, Cham, pp. 171-178. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-40265-9_12 [Accessed 23 October 2023].

Ghobakhloo, M. (2020), “Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 252, article 119869, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869 [Accessed 16 October 2023].

Grand View Research (2018), *4D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report by Material (Programmable Carbon Fiber, Programmable Wood, Programmable Textiles), By End-Use, By Region, And Segment Forecasts, 2018-2025*. [Online] Available at: grandviewresearch.com/industry-analysis/4d-printing-market/toc [Accessed 23 October 2023].

Graser, K., Kahlert, A. and Hall, D. M. (2021), “DFAB HOUSE – Implications of a building-scale demonstrator for adoption of digital fabrication in AEC”, in *Construction Management and Economics*, vol. 39, issue 10, pp. 853-873. [Online] Available at: doi.org/10.1080/01446193.2021.1988667 [Accessed 16 October 2023].

Hager, I., Golonka, A. and Putanowicz, R. (2016), “3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction?”, in *Procedia Engineering*, vol. 151, pp. 292-299. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357 [Accessed 16 October 2023].

Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P. and Suman, R. (2021), “Significant roles of 4D printing using smart materials in the field of manufacturing”, in *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 4, issue 4, pp. 301-311. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.05.001 [Accessed 16 October 2023].

Heywood, K. and Nicholas, P. (2023), “Sustainability and 3D concrete printing – Identifying a need for a more holistic approach to assessing environmental impacts”, in *Architectural Intelligence*, vol. 2, article 12, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s44223-023-00030-3 [Accessed 16 October 2023].

Hryhorovskiy, P., Osadcha, I., Jurelionis, A., Basanskyi, V. and Hryhorovskiy, A. (2022), “A BIM-Based Method for Structural Stability Assessment and Emergency Repairs of Large-Panel Buildings Damaged by Military Actions and Explosions – Evidence from Ukraine”, in *Buildings*, vol. 12, issue 11, article 1817, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings12111817 [Accessed 16 October 2023].

Hosseini, S. M., Mohammadi, M. and Guerra-Santin, O. (2019), “Interactive kinetic façade – Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant’s positions by 2D and 3D shape changes”, in *Building and Environment*, vol. 165, article 106396, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106396 [Accessed 16 October 2023].

IAAC (2022), *Open Thesis Fabrication – 3D Printing in Architecture*. [Online] Available at: issuu.com/3dpa20212022/docs/2122_rs_booklet_template_otf_online [Accessed 16 October 2023].

Jang, S.-Y., Lee, S. and Kim, S.-A. (2013), “Collaborative Responsive Façade Design Using Sensor and Actuator Network”, in Luo, Y. (ed.), *Cooperative Design, Visualization, and Engineering*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 8091, Springer, Berlin-Heidelberg, pp. 11-18. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-642-40840-3_2 [Accessed 16 October 2023].

Khoo, Z. X., Teoh, J. E. M., Liu, Y., Chua, C. K., Yang,

- S., An, J., Leong, K. F. and Yeong, W. Y. (2015), "3D printing of smart materials – A review on recent progresses in 4D printing", in *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 10, issue 3, pp. 103-122. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054 [Accessed 16 October 2023].
- Kim, M.-S., Heo, J.-K., Rodrigue, H., Lee, H.-T., Pané, S., Han, M.-W. and Ahn, S.-H. (2023), "Shape Memory Alloy (SMA) Actuators – The Role of Material, Form, and Scaling Effects", in *Advanced Materials*, vol. 35, issue 33, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.1002/adma.202208517 [Accessed 16 October 2023].
- Kuang, X., Chen, K., Dunn, C. K., Wu, J., Li, V. C. F. and Qi, H. J. (2018), "3D printing of highly stretchable, shape-memory, and self-healing elastomer toward novel 4D printing", in *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 10, issue 8, pp. 7381-7388. [Online] Available at: doi.org/10.1021/acsami.7b18265 [Accessed 16 October 2023].
- Leist, S. K. and Zhou, J. (2016), "Current status of 4D printing technology and the potential of light-reactive smart materials as 4D printable materials", in *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 11, issue 4, pp. 249-262. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17452759.2016.1198630 [Accessed 16 October 2023].
- Li, Q., Schenning, A. P. H. J. and Bunning, T. J. (2019), "Light-Responsive Smart Soft Matter Technologies", in *Advanced Optical Materials*, vol. 7, issue 16, pp. 1-3. [Online] Available at: doi.org/10.1002/adom.201901160 [Accessed 16 October 2023].
- Li, S., Yuan, S., Zhu, J., Wang, C., Li, J. and Zhang, W. (2020), "Additive manufacturing-driven design optimization – Building direction and structural topology", in *Additive Manufacturing*, vol. 36, article 101406, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.addma.2020.101406 [Accessed 16 October 2023].
- McKinsey Global Institute (2017), *Reinventing Construction – A route to higher productivity*. [Online] Available at: mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/mgi-reinventing-construction-a-route-to-higher-productivity-full-report.pdf [Accessed 16 October 2023].
- Momeni, F., Hassani, N. S. M., Liu, X. and Ni, J. (2017), "A review of 4D printing", in *Materials & Design*, vol. 122, pp. 42-79. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.068 [Accessed 16 October 2023].
- Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G. M. and Gruner, R. L. (2020), "Exploring environmental benefits of reuse and recycle practices – A circular economy case study of a modular building", in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 160, article 104855, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104855 [Accessed 16 October 2023].
- Miodownik, M. (2015), *La sostanza delle cose – Storie incredibili dei materiali meravigliosi di cui è fatto il mondo*, Bollati Boringhieri, Torino.
- Nida, S., Moses, J. A. and Anandharamkrishnan, C. (2022), "Emerging applications of 5D and 6D printing in the food industry", in *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 10, article 100392, pp. 1-3. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100392 [Accessed 16 October 2023].
- Oke, A. E., Aliu, J., Fadamiro, P. O., Akanni, P. O. and Stephen, S. S. (2023), "Attaining digital transformation in construction – An appraisal of the awareness and usage of automation techniques", in *Journal of Building Engineering*, vol. 67, article 105968, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobte.2023.105968 [Accessed 16 October 2023].
- Oxford Economics (2023), *Global Construction Futures – A global forecast for the construction industry to 2037*. [Online] Available at: oxfordeconomics.com/resource/global-construction-futures/ [Accessed 30 October 2023].
- Paoletti, I. (2017), "Involucri responsivi – Sperimentazioni con modelli a comportamento naturale | Responsive Envelopes – Experimentations by natural Role Models", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 2, pp. 213-218. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/2282017 [Accessed 16 October 2023].
- Paolini, A., Kollmannsberger, S. and Rank, E. (2019), "Additive manufacturing in construction – A review on processes, applications, and digital planning methods", in *Additive Manufacturing*, vol. 30, article 100894, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894 [Accessed 16 October 2023].
- Pasco, J., Lei, Z. and Aranas, C. Jr. (2022), "Additive Manufacturing in Off-Site Construction – Review and Future Directions", in *Buildings*, vol. 12, article 53, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings12010053 [Accessed 16 October 2023].
- Pei, E. (2014), "4D printing – Revolution or fad?", in *Assembly Automation*, vol. 34, issue 2, pp. 123-127. [Online] Available at: doi.org/10.1108/AA-02-2014-014 [Accessed 16 October 2023].
- Pei, E., Loh, G. H. and Nam, S. (2020), "Concepts and terminologies in 4D printing", in *Applied Sciences*, vol. 10, issue 13, article 4443, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app10134443 [Accessed 16 October 2023].
- Perriccioli, M., Ruggiero, R. and Salka, M. (2021), "Ecologia e tecnologie digitali – L'architettura alla piccola scala come luogo di connessioni | Ecology and digital technologies – Small-scale architecture as a place of connections", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 10, pp. 36-45. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1032021 [Accessed 16 October 2023].
- Pone, S. (2022), "Maker – Il ritorno dei costruttori – Una possibile transizione digitale per l'Architettura | Maker – The return of the builders – A possible digital transition for Architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 14-23. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1212022 [Accessed 16 October 2023].
- Rastogi, P. and Kandasubramanian, B. (2019), "Breakthrough in the printing tactics for stimuli-responsive materials – 4D printing", in *Chemical Engineering Journal*, vol. 366, pp. 264-304. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.085 [Accessed 16 October 2023].
- Ribeirinho, M. J., Mischke, J., Strube, G., Sjödin, E., Blanco, J. L., Palter, R., Biörck, J., Rockhill, D. and Andersson, T. (2020), *The next normal in construction – How disruption is reshaping the world's largest ecosystem*, McKinsey & Company. [Online] Available at: dln.jaipuria.ac.in:8080/jspui/bitstream/123456789/14341/1/The-next-normal-in-construction.pdf [Accessed 16 October 2023].
- Russo, D. and Moretti, M. (2020), "Shamballa, il Paradiso può attendere – Come la stampa 3D sostiene il futuro | Shamballa, Heaven can wait – How 3D printing will sustain the future", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 32-43. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/832020 [Accessed 16 October 2023].
- Saritha, D. and Dhatreyi, B. (2021), "A concise review on 4D printing technology", in *Materials Today | Proceedings*, vol. 46, part 1, pp. 692-695. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.016 [Accessed 16 October 2023].
- Smith, R. S. H., Bader, C., Sharma, S., Kolb, D., Tang, T.-C., Hosny, A., Moser, F., Weaver, J. C., Voigt, C. A. and Oxman, N. (2020), "Hybrid Living Materials – Digital Design and Fabrication of 3D Multimaterial Structures with Programmable Biohybrid Surfaces", in *Advanced Functional Materials*, vol. 30, issue 7, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1002/adfm.201907401 [Accessed 16 October 2023].
- Sposito, C. and Scalisi, F. (2019), "Innovazione dei materiali naturali – Terra e nanotubi di argilla per una sfida sostenibile | Natural material innovation – Earth and halloysite nanoclay for a sustainable challenge", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 59-72. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/572019 [Accessed 16 October 2023].
- Sposito, C. and Scalisi, F. (2017), "Strumenti e materiali per la fabbricazione digitale in architettura | Instruments and materials for digital manufacturing in architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 1, pp. 143-152. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1222017 [Accessed 16 October 2023].
- Strzelec, K., Sienkiewicz, N. and Szmechtyk, T. (2020), "Classification of Shape-Memory Polymers, Polymer Blends, and Composites", in Parameswaranpillai, J., Siengchin, S., George, J. and Jose, S. (eds), *Shape Memory Polymers, Blends and Composites*, Advanced Structured Materials series, vol. 115, Springer, Singapore, pp. 21-52. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-981-13-8574-2_2 [Accessed 16 October 2023].
- Tai, Y.-J. T., Bader, C., Ling, A. S., Disset, J., Darweesh, B., Duro-Royo, J., van Zak, J., Hogan, N. and Oxman, N. (2018), "Designing (for) Decay – Parametric Material Distribution for Hierarchical Dissociation of Water-based Biopolymer Composites", in Mueller, C. and Adriaenssens, S. (eds), *Proceedings of the IASS Symposium 2018 – Creative in Structural Design, July 16-20, 2018, MIT, Boston*, pp. 1-8. [Online] Available at: oxman.com/files/85c33ef4-ca38-4a13-919a-4ca1df71bf25/Designing-(for)-Decay.-Parametric-Material-Distribution-for-Hierarchical-Dissociation-of-Water-based-Biopolymer-Composites-(2018).pdf [Accessed 16 October 2023].
- Tibbits, S. (2014), "4D printing – Multi-material shape change", in *Architectural Design*, vol. 84, issue 1, pp. 116-121. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ad.1710 [Accessed 16 October 2023].
- Tibbits, S. and Cheung, K. (2012), "Programmable materials for architectural assembly and automation", in *Assembly Automation*, vol. 32, issue 3, pp. 216-225. [Online] Available at: doi.org/10.1108/01445151211244348 [Accessed 16 October 2023].
- Tucci, F. (2017), "Paradigmi della Natura per Progettare Involucri architettonici | Nature's Paradigms for Designing Architectural Envelopes", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 2, pp. 47-54. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/262017 [Accessed 16 October 2023].
- Vatanparast, S., Boschetto, A., Bottini, L. and Gaudenzi, P. (2023), "New Trends in 4D Printing – A Critical Review", in *Applied Sciences*, vol. 13, issue 13, article 7744, pp. 1-37. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app13137744 [Accessed 16 October 2023].
- Yi, H. (2021), "4D-printed parametric façade in architecture – Prototyping a self-shaping skin using programmable two-way shape memory composite (TWSMC)", in *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 29, issue 10, pp. 4132-4152. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1108/ECAM-05-2021-0428 [Accessed 16 October 2023].
- Yi, H. and Kim, Y. (2021), "Prototyping of 4D-printed self-shaping building skin in architecture – Design, fabrication, and investigation of a two-way shape memory composite (TWSMC) façade panel", in *Journal of Building Engineering*, vol. 43, article 103076, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobte.2021.103076 [Accessed 16 October 2023].
- Yi, H., Kim, D., Kim, Y., Kim, D., Koh, J. and Kim, M. (2020), "3D-Printed Attachable Kinetic Shading Device with Alternate Actuation – Use of Shape-Memory Alloy (SMA) for Climate-Adaptive Responsive Architecture", in *Automation in Construction*, vol. 114, article 103151, pp. 103-151. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103151 [Accessed 16 October 2023].
- Zhang, Y., Zhang, C., Wang, R., Tan, W., Gu, Y., Yu, X., Zhu, L. and Liu, L. (2022), "Development and challenges of smart actuators based on water-responsive materials", in *Soft Matter*, vol. 18, issue 31, pp. 5725-5741. [Online] Available at: doi.org/10.1039/D2SM00519K [Accessed 16 October 2023].

ARTICLE INFO

Received 14 September 2023
Revised 01 October 2023
Accepted 17 October 2023
Published 31 December 2023

MISURARE I PAESAGGI

Un ritmo per la narrazione attraverso luoghi e itinerari condivisi

MEASURING LANDSCAPES

A storytelling rhythm through shared places and itineraries

Adriana Gherzi, Silvia Pericu, Federica Delprino, Stefano Melli

ABSTRACT

La sperimentazione in tre territori differenti consente di mettere a punto una narrazione modulare in base ai caratteri specifici dei paesaggi, attraverso itinerari e punti notevoli in grado di rappresentarne le peculiarità. Comprendere la qualità di paesaggi diversi, espressione di valori e culture locali, coinvolgere le comunità per un racconto condiviso della memoria e dei luoghi più significativi e promuoverli, riscoprendo le potenzialità del turismo esperienziale sono gli obiettivi della ricerca, che prevede un approccio integrato al tema della conoscenza e fruizione del paesaggio, individuando il ritmo specifico dei luoghi da attraversare, mediante l'uso di strumenti digitali innovativi e la condivisione con le comunità locali, come strumento di solidarietà e di attivazione di relazioni tra fruitori ed abitanti, per uno storytelling dinamico che consente ulteriori arricchimenti.

The experimentation in three different territories makes it possible to develop a modular narrative based on specific landscapes through itineraries and remarkable points capable of representing their peculiarities. Understanding the quality of the different landscapes as the expression of local values and cultures, involving the communities for a shared narration of the memory and the most significant places and promoting them, and rediscovering the potential of experiential tourism are the objectives of the research. It envisages an integrated approach to the theme of knowledge and enjoyment of the landscape, identifying specific rhythms in the places to cross, through innovative digital tools and sharing with the local communities, looking for solidarity and activation of relations between users and inhabitants, for a dynamic storytelling that allows for further enrichment.

KEYWORDS

misura del paesaggio, percorso e balconi, narrazione, design per i territori, comunità e turismo esperienziale

landscape measure, routes and balconies, storytelling, design for territories, community and experiential tourism

Adriana Gherzi is an Associate Professor of Landscape Architecture at the Architecture and Design Department, University of Genoa (Italy). Her research focuses on landscape analysis, planning and design at various scales, therapeutic landscapes, historic gardens and rural terraced landscapes. E-mail: adriana.ghersi@unige.it

Silvia Pericu, Associate Professor in Product Design at the Architecture and Design Department, University of Genoa (Italy), bases her research on the possibilities of Design to contribute to developing and transforming territories concerning health, safety and sustainability. E-mail: silvia.pericu@unige.it

Federica Delprino, PhD in Design at the DAD of the University of Genoa (Italy), investigates inclusive design processes and (meta)instruments in the field of Experience and Interaction Design, also from a phygital perspective. E-mail: federica.delprino@edu.unige.it

Stefano Melli, Landscape Architect and PhD at the DAD of the University of Genoa (Italy), develops his research on the integration models of anthropic and vegetal components in the urban landscape's ecological dynamics. E-mail: stefano.melli.t9@gmail.com



L'odierna riflessione sull'impatto del turismo nei nostri territori, sollecitata sempre più da fenomeni di overtourism¹, rivela la necessità di adottare modelli alternativi di turismo. In tal senso il paesaggio inteso come frutto dell'assidua interazione umana su un dato territorio (Lai, 2004; Zagari, 2006) può attivare interazioni tra visitatori e comunità territoriali, garantendo uno sviluppo locale più equilibrato (Castelnuovi, 2012). In quest'ottica, il paper riporta un'attività di ricerca che si rivolge alla relazione tra spazio, comunità e turismo a partire dalle unità di paesaggio, quali tessere di un articolato mosaico dal carattere fortemente identitario (Turri, 1998).

La ricerca, affidata al DAD dell'Università di Genova nell'ambito del Progetto europeo Pays Aimables² dalla Camera di Commercio Riviere di Liguria e dall'ATL di Cuneo per il Piemonte (Fig. 1), ha l'obiettivo di sviluppare un piano di analisi, valorizzazione e promozione ai fini turistici di alcuni paesaggi di Liguria e Piemonte, sperimentando interventi operativi. Per ciascun ambito territoriale la metodologia di ricerca ha individuato una struttura di attraversamento che, a partire da una serie di luoghi panoramici di rilevante interesse – i cosiddetti 'balconi' – sapesse narrare le identità dei diversi paesaggi, coinvolgere gli attori locali, e promuovere azioni innovative ed esperienze immersive. Per conoscere un paesaggio, infatti, è necessario percorrerlo, comprenderne le sequenze e individuarne il ritmo (Bocchi, Latini and Szanto, 2014).

A questo la ricerca ha aggiunto la volontà di conservare il racconto della memoria come elemento identitario con un triplice obiettivo: dar vita alle voci e alle storie legate al patrimonio culturale; permetterne una reale fruizione, in una prospettiva esperienziale; stimolare l'immaginazione e suscitare emozioni (Roussou, 2008). A una lettura del paesaggio che ha permesso di comprenderne la qualità è stata affiancata perciò un'analisi percettiva attraverso strumenti di innovazione tecnologica (Bernardini and De Mauro, 2005), utilizzando le immagini condivise online e i sentimenti espressi, georeferenziati nei luoghi attraversati.

Le recenti trasformazioni digitali hanno moltiplicato le opportunità di accesso a contenuti culturali e turistici prodotti con tecniche di realtà virtuale e aumentata (Colombo, 2020), sperimentando l'integrazione tra le competenze dell'Architettura del Paesaggio e quelle del Design per i Territori (Villari, 2012). La presente ricerca, legandosi a recenti esperienze di storytelling, ha quindi proposto una narrazione dei tasselli del paesaggio come moduli identitari del territorio, fruibili a cavallo tra digitale e reale. La stessa modalità di narrazione dei luoghi costituisce una matrice replicabile che aiuta a individuare i caratteri peculiari del paesaggio e le modalità operative strategiche per attuare azioni in grado di costruire relazioni affettive tra visitatore e luoghi. In molti territori, infatti, lo spopolamento dei piccoli borghi e l'abbandono dei territori agricoli ha innescato un diffuso processo di deterritorializzazione (Magnaghi, 2001), conducendo all'oblio un patrimonio paesaggistico di grande pregio e, con esso, anche quel sistema di valori, conoscenze e tradizioni legati alla cura del paesaggio.

L'utilità della ricerca si rende evidente non solo perché applicabile alle aree indagate dal progetto Pays Aimables – ovvero tre paesaggi differenti tra Liguria e Piemonte: Imperiese, Alta Val Tanaro e Alta Langa (Figg. 2, 3) – ma, potenzialmente, a tutti

quei territori dell'area mediterranea che condividono il senso di spaesamento e il forte bipolarismo causati dall'abbandono di aree marginali rispetto ad altre più note (Baró Zarzo, Poyatos Sebastián and Martínez Martínez, 2020).

Rispetto allo stato dell'arte la ricerca individua, inoltre, alcuni passaggi fondamentali per attivare Enti territoriali e comunità, in relazione al miglioramento della qualità del turismo dei piccoli numeri: sono infatti le Istituzioni territoriali minute, come i Comuni italiani delle aree interne, ad aver bisogno di progetti di promozione sostenibili, soprattutto se si parla di offerta digitale innovativa. L'accesso a risorse e competenze diffuse attraverso reti di relazioni che possano estendersi ben oltre i confini locali amplia l'interesse e l'impatto del progetto: i luoghi e i paesaggi da promuovere diventano piccoli nodi all'interno di un sistema più complesso, interconnessi attraverso uno «[...] storytelling costruito con elementi modulari tali da poter essere ricombinati in relazione a vari contesti, al fine di creare un beneficio per i siti minori attraverso il collegamento con quelli più noti» (Colombo and Marasco, 2020, p. 102). Il lavoro presenta così la possibilità di esaltare peculiarità specifiche attraverso un approccio progettuale scalabile.

Paesaggi da amare e comunità locali | I 'balconi panoramici', moduli di una partitura fisico-estetica dello spazio (Tuzzolino, 2012), sono luoghi esperienziali del paesaggio e scandiscono un ritmo e una sequenza di lettura lungo una linea che, dispiegandosi all'interno dei territori, permette di leggerne i caratteri, di confrontarsi con le possibilità offerte e di incontrarne i protagonisti: il balcone, che inquadra una vista significativa del paesaggio, porta il visitatore a cogliere la complessità dei tratti essenziali che lo definiscono (Ghersì et alii, 2022) e ne orienta lo sguardo verso la definizione di un racconto (Jakob, 2022) alternativo a quello di luoghi più celebri e popolari. L'itinerario scandito dai balconi diviene dunque un'infrastruttura conoscitiva che ridisegna la geografia emozionale (Colafranceschi, 2020) di un paesaggio meno conosciuto.

Le singolarità dei paesaggi vengono quindi esplorate da una prospettiva non solo territoriale, ma umana, coinvolgendo le comunità locali in quanto portatrici di conoscenza e indagando il concetto di paesaggio come prodotto, «[...] nell'accezione di paesaggio contemporaneo al quale ascrivere le atmosfere culturali che sostanziano quelle produttive» (Sbordone and Veneziano, 2007, p. 66).

Progetti ed esperienze di riferimento | Il progetto Pays Aimables prende spunto dall'intervento sui balconi dolomiti del 2014³: una rete di hotspot panoramici con immagine coordinata a cavallo tra reale e digitale, in cui le applicazioni della tecnologia, gli standard comunicativi delle interfacce e una banca dati dei materiali comunicativi arricchiscono l'esperienza di fruizione del patrimonio culturale. Altri esempi hanno mostrato come l'attraversamento del paesaggio con itinerari, sentieri tematici o percorsi a tema che toccano luoghi di interesse, possa diventare strumento di comunicazione dei valori presenti (Fig. 4).

Tra i casi più rilevanti è da citare il progetto di Paolo Bürgi realizzato nel 2000 a Cardada sul Lago Maggiore, che riesce a rivelare le qualità nascoste del paesaggio, mettendo in relazione la

storia geologica con quella botanica e culturale del territorio. L'Osservatorio Geologico è un disco in oggetto sul paesaggio che racconta, attraverso le diverse rocce e il tracciato della linea insubrica tra Africa ed Europa, la relazione tra memoria umana e storia geologica (Venturi Ferriolo, 2007). Un altro noto esempio riguarda la Norwegian Scenic Route, costruita tra 2005 e 2023 inserendo opere di architettura, architettura del paesaggio e land art quali attrattori turistici puntuali da cui osservare il paesaggio dei fiordi (Herren, 2019), come l'iconica passerella di Stegastein progettata da Saunders e Wilhelmsen.

Del 2019 è il lavoro dello Studio Land con Ikon per promuovere il turismo nel Collio isontino (Friuli Venezia Giulia). Utilizzando contenuti virtuali aumentati tramite l'App Collio XR, il progetto fornisce un racconto itinerante degli itinerari ciclo-pedonali che riporta in luce memorie e narrazioni dei luoghi. Nel progetto WUC⁴ per Matera il linguaggio audiovisivo diviene veicolo privilegiato per un racconto corale ed esperienziale, che permette di includere la produzione continua di immagini utilizzando tecnologie immersive (Colonna, 2015).

Si assiste quindi a un approccio che sposta il focus dal servizio (Raajpoot, 2002) all'esperienza del pubblico (Bakhshi and Throsby, 2012), oltrepassando la contrapposizione tra reale e digitale per considerare lo spazio online non solo in funzione di quello fisico ma, piuttosto, come opportunità nuova⁵ (King, Stark and Cooke, 2016). Gli esempi citati sono utili riferimenti, verso il superamento delle modalità statiche del racconto di paesaggio. E se, nei casi più rilevanti, la struttura narrativa è affiancata da onerose opere di architettura, arte e paesaggio, la presente ricerca offre invece un approccio utile a quelle realtà che possono utilizzare solo risorse limitate, offrendo una possibile implementazione continua da parte di esperti locali e operatori turistici.

Un approccio integrato | La metodologia individuata e sperimentata nei casi studio del progetto Pays Aimables ha un carattere fortemente integrato. I passaggi fondamentali riguardano: la lettura fisica e l'interpretazione modulare dei paesaggi; le interazioni con la comunità locale e l'analisi della percezione dei fruitori; l'individuazione di una sequenza di punti notevoli rappresentativi lungo itinerari di scoperta (percorsi e balconi); la costruzione del racconto attraverso esperti e testimoni locali (interviste, foto a 360°, proposta di attività ed esperienze); infine la possibilità di arricchimento dei contenuti con il coinvolgimento di aziende e operatori (implementazione volontaria per mezzo di siti commerciali), attraverso uno strumento agile che sia in grado di accompagnare e integrare i vari processi, creando utili sinergie (Authier and Lévy, 2000).

La metodologia iniziale di interpretazione si basa sul concetto di 'ecomosaico' (Blandin and Lamotte, 1988), secondo cui il paesaggio è costituito da un insieme articolato di tessere che ne rappresentano le unità ecosistemiche minime e omogenee (Ingegnoli, 2011). A questa complessità strutturale, vanno integrati i segni culturali che costituiscono il patrimonio materiale e immateriale di un paesaggio: riti e tradizioni, miti e piccole storie, scelte e modalità di trasformazione. Scomponendo, dunque, l'intero sistema in moduli deve successivamente essere ricomposto attraverso pro-

Tuttavia il risultato è stato solo parzialmente raggiunto: le sperimentazioni concrete sui tre territori hanno rivelato alcuni limiti, legati soprattutto alla difficoltà di gestire il processo di implementazione; ad esempio, le interviste, fondamentali nel racconto dei luoghi, sono state eliminate durante il trasferimento dei contenuti nel travel book per difficoltà di traduzione e per evitare di giustificare la scelta dei testimoni; anche le aspettative sulla promozione del progetto sono state disattese, limitando la diffusione dei risultati e rendendo statica la struttura del racconto. Tali limiti si legano all'aspetto dinamico che maggiormente caratterizza l'approccio teorico e che sarebbe interessante sperimentare in altre realtà. La prima struttura interpretativa per costruire il travel-book è infatti il punto di partenza di un processo che potrebbe portare a ulteriori miglioramenti di un lavoro di squadra tra gli operatori. Sarebbe interessante, per il futuro, poter ampliare la sperimentazione o provare a portare avanti il lavoro di coinvolgimento degli operatori per una reale promozione turistica.

Riflessioni conclusive sulla replicabilità del modello | La scelta di attraversare il paesaggio con un itinerario scandito da luoghi di interesse offre un modello di narrazione replicabile, che mira alla valorizzazione delle risorse paesaggistiche in relazione a tradizioni locali e al sentiment turistico. Ma la lettura approfondita della complessità dei paesaggi necessita la comprensione delle specificità di ogni contesto, rispetto al quale l'individuazione degli elementi salienti come moduli di un racconto materiale e immateriale permette di condividere e comunicare valori del paesaggio anche poco noti. Pur nei limiti della realizzazione, la replicabilità del progetto Pays Aimables è stata dimostrata dall'interesse dimostrato dai partner francesi che ne hanno adottato il modello.

Rispetto a consolidate metodologie di lettura il lavoro restituisce piena centralità agli attori locali, vera chiave di volta della ricerca, traguardando un continuo arricchimento del racconto grazie alle tecnologie digitali. Attraverso questa struttura narrativa e proponendo esperienze di 'turismo lento' e immersivo è possibile attuare reali strategie di promozione territoriale e avviare processi di collaborazione con operatori ed esperti locali. Nelle applicazioni future sarebbe significativo riuscire a coinvolgere maggiormente le Amministrazioni locali, costruendo interazioni con tutti i portatori di interesse, affinché il lavoro possa essere un reale strumento di comunicazione tra le parti, non solo l'esito di un progetto europeo portato a termine e non più utilizzato.

The current reflection on the impact of tourism in our territories, which are increasingly stressed by the phenomena of overtourism¹, reveals the need to adopt alternative tourist models. In this sense, the landscape understood as the fruit of assiduous human interaction on a given territory (Lai, 2004; Zagari, 2006) can activate interactions between

visitors and territorial communities, guaranteeing a more balanced local development (Castelnuovi, 2012). In this perspective, the paper reports a research activity that addresses the relationship between space, community and tourism from a landscape unit as tesserae of an articulated mosaic with a strong identity character (Turri, 1998).

The research, entrusted to the DAD of the University of Genoa within the framework of the European Project Pays Aimables² by the Chamber of Commerce Riviere di Liguria and the ATL of Cuneo for Piedmont (Fig. 1), has the objective of developing a plan for the analysis, valorisation and promotion for tourism purposes of some Ligurian and Piedmontese landscapes, experimenting with operational interventions. For each territorial area, the research methodology identified a crossing structure that, starting from a series of panoramic places of relevant interest – the so-called 'balconies' – would be able to tell the identities of the different landscapes, involve local actors, and promote innovative actions and immersive experiences. Familiarising with a landscape requires walking through it, figuring out its sequences and identifying its rhythm (Bocchi, Latini and Szanto, 2014).

To this, research has added the desire to preserve the narrative of memory as an element of identity with a threefold objective: to revive voices and stories related to cultural heritage; to allow actual enjoyment from an experiential perspective; to stimulate the imagination and arouse emotions (Roussou, 2008). The reading of the landscape to comprehend its qualities was, therefore,

flanked by a perceptive analysis through technological innovation tools (Bernardini and De Mauro, 2005), using the images shared online and the sentiments expressed, georeferenced to the places crossed.

Recent digital transformations have multiplied the opportunities for access to cultural and tourist content produced with virtual and augmented reality techniques (Colombo, 2020), experimenting with the integration between the competencies of Landscape Architecture and those of Design for the Territory (Villari, 2012). The present research, linking up with recent storytelling experiences, has thus proposed a narration of the landscape's pieces as identity modules of the territory, usable between the digital and the real. The same modality of narration of places constitutes a replicable matrix that helps identify the landscape's peculiar characteristics and the strategic operative modalities to implement actions capable of building effective relationships between visitors and places. In many territories, the depopulation of small towns and the abandonment of agricultural territories have triggered a widespread process of deterritorialisation (Magnaghi, 2001), leading to the oblivion of a landscape heritage of great value and, with it, that system of values, knowledge and traditions linked to the care of the landscape.

The usefulness of the research is evident not only because it applies to the areas investigated by the Pays Aimables project – that is, three different landscapes between Liguria and Piedmont: Imperiese, Alta Val Tanaro and Alta Langa (Figg.



Fig. 2 | Ligurian Landscapes Moodboard (credits: F. Delprino).

Fig. 3 | Piedmontese Landscapes Moodboard (credits: F. Delprino and A. Gheresi).

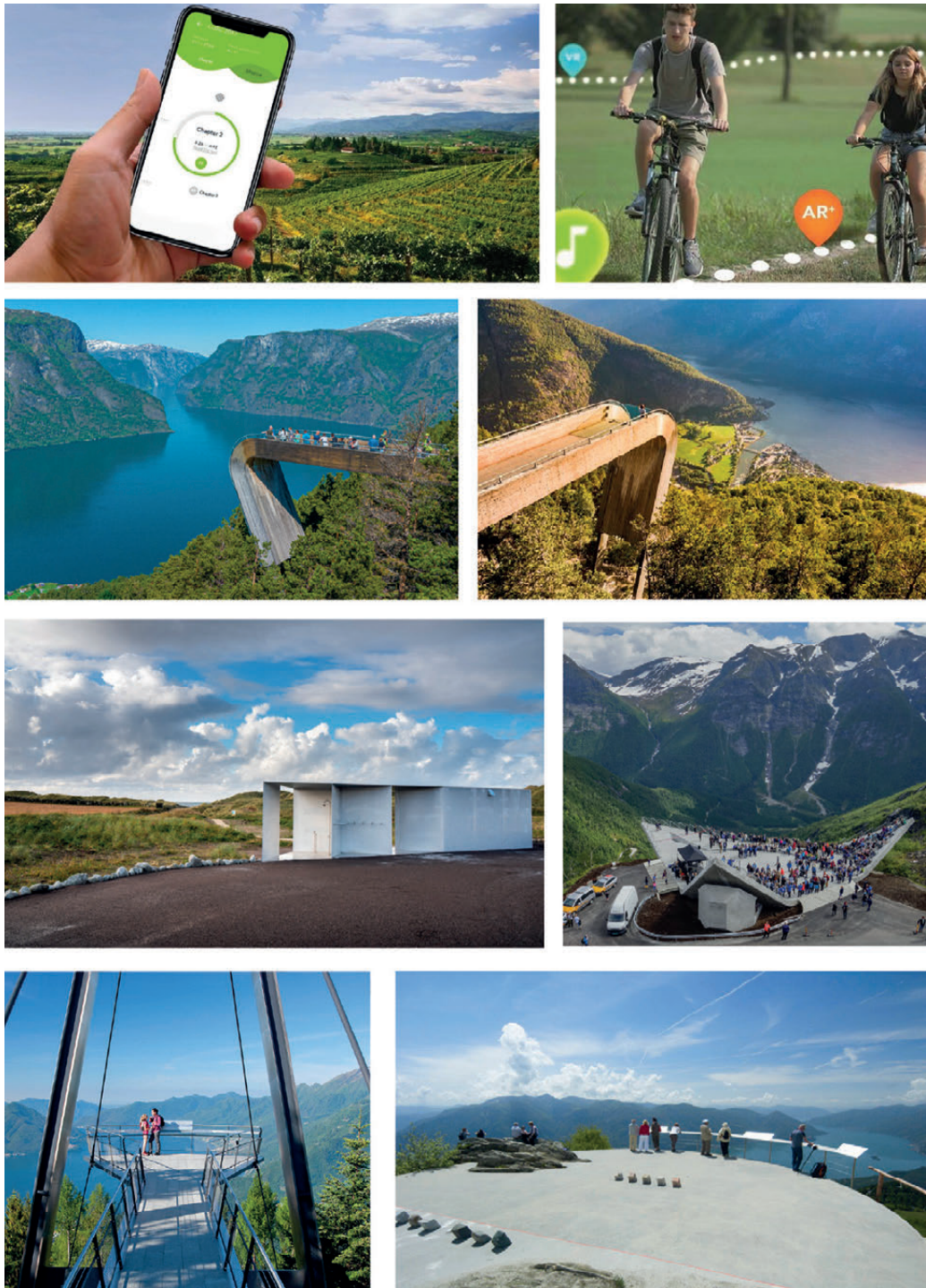


Fig. 4 | Case study selection: Collio XR App; Stegastein footbridge; Norwegian Scenic Route; Geological Observatory on Lake Maggiore in Cardada (Locarno).

2, 3) – but, potentially, to all those territories in the Mediterranean area that share the sense of disorientation and strong bipolarity caused by the abandonment of marginal areas in relation to other more renowned ones (Baró Zarzo, Poyatos Sebastián and Martínez Martínez, 2020).

Compared to the state of the art, the research also identifies some fundamental steps to activate territorial authorities and the communities concerning improving the quality of small-scale tourism: it is the small territorial institutions, such as the Italian municipalities of the internal areas, that need sustainable promotion projects, especially when it comes to innovative digital offers. Access to widespread resources and competencies through networks of relations that can extend well beyond

local borders broadens the interest and impact of the project: places and landscapes requiring promotion become small nodes within a more complex system, interconnected through a storytelling constructed with modular elements that can be recombined to various contexts, to create a benefit for minor sites by linking them with the better-known ones (Colombo and Marasco, 2020). The work thus presents the possibility of enhancing specific peculiarities through a scalable design approach.

Landscapes to cherish and local communities

| The 'panoramic balconies', modules of a physical-aesthetic score of space (Tuzzolino, 2012), are experiential places of the landscape and mark out

a rhythm and a reading sequence along a line that, unfolding within the territories, allows one to read its characters, to confront the possibilities offered and to meet its protagonists. The balcony, framing a significant view of the landscape, leads the visitor to grasp the complexity of the essential traits that define it (Gherzi et alii, 2022) and directs their gaze towards the definition of a narrative (Jakob, 2022) alternative to that of more well-known and frequented places. The itinerary marked by the balconies thus becomes a cognitive infrastructure that re-designs a little-known landscape's emotional geography (Colafranceschi, 2020).

The singularities of landscapes take on a perspective that is not only territorial but also human, involving local communities as bearers of knowledge and investigating the concept of landscape as product, in the sense of contemporary landscape to which we attribute the cultural atmospheres that substantiate the productive ones (Sbordone and Veneziano, 2007).

Reference projects and experiences

| The Pays Aimables project takes its cue from the Balconies of the Dolomites project of 2014³: a network of panoramic hotspots with a coordinated image straddling the real and the digital, in which technological applications, communication interface standards and a database of communication materials enrich the experience of enjoying cultural heritage. Other examples have shown how traversing the landscape with itineraries, thematic routes or touching places of interest can become a means of communicating the present values (Fig. 4).

One of the most striking cases is Paolo Bürgi's 2000 project in Cardada, on Lake Maggiore, which reveals the landscape's hidden qualities, linking the geological history with the botanical and cultural history of the area. The Geological Observatory is a disc overhanging the landscape that tells the story of the relationship between human memory and geological history through the different rocks and the insubric line between Africa and Europe (Venturi Ferriolo, 2007). Another well-known example is the Norwegian Scenic Route, which was realised between 2005 and 2023 by incorporating works of architecture, landscape architecture and land art as punctual tourist attractions from which to observe the fjord landscape (Herren, 2019), such as the iconic Stegastein footbridge designed by Saunders and Wilhelmsen. Studio Land's work with Ikon to promote tourism in Collio Isontino (Friuli Venezia Giulia, Italy) dates back to 2019. Using augmented virtual content through the Collio XR App, the project provides an itinerant narrative of the cycling and walking routes that brings out memories and narrations of the places. In the WUC⁴ project for Matera, the audiovisual language becomes the privileged vehicle of a choral and experiential narration, which allows the continuous production of images through immersive technologies (Colonna, 2015).

Hence, there is an approach that shifts the focus from service (Raajpoot, 2002) to audience experience (Bakhshi and Throsby, 2012), overcoming the opposition between real and digital to consider online space not only as a function of the physical one but, rather, as a new opportunity⁵ (King, Stark and Cooke, 2016). Examples cited provide helpful references for overcoming static modes of landscape narration. And if, in the most relevant cases,

the narrative structure stands alongside costly architectural, artistic and landscape works, this research instead offers a fruitful approach to those realities that can only utilise limited resources, proposing a possible continuous implementation by local experts and tour operators.

An integrated approach | The methodology identified and tested in the Pays Aimables project case studies has a highly integrated character. The fundamental steps involve the physical reading and modular interpretation of the landscapes; the interactions with the local community and the analysis of the perception of the users; the identification of a sequence of notable representative points along discovery itineraries (routes and balconies); the construction of the narrative through local experts and witnesses (interviews, 360° photos, the proposal of activities and experiences); finally, the possibility of content enrichment with the involvement of companies and operators (voluntary implementation using commercial sites), through an agile tool capable of accompanying and integrating the various processes, creating beneficial synergies (Authier and Lévy, 2000).

The initial methodology of interpretation relies on the 'eco mosaic' concept (Blandin and Lamotte, 1988), according to which the landscape consists of an articulated set of tesserae representing minimal and homogeneous ecosystem units (Ingegnoli, 2011). In addition to this structural complexity, the cultural signs make up a landscape's material and immaterial heritage: rituals and traditions, myths and little stories, choices and modes of transformation. Thus, by breaking down the entire system into modules, it must subsequently re-compose itself through processes of synthesis (Morelli, 2005), in which each module (mountain pastures, forests, terraces, paths, perched villages, olive groves and vineyards) acquires a different cultural value depending on the context in which it is found (Fumo, 2019). Landscape acquires meanings if we link it to the society that produces it, to its internal metabolisms, to the dialogue or con-

flicts that take place between technicians and poets, between engineers and artists (Turri, 2010).

On the other hand, to understand visitors' perceptions of the landscape, it is conceivable to resort to netnography, a methodological tool that al-

lows us to identify the imprint of images shared online and tourists' feelings towards the places they visit. Online behaviours and visual and narrative description modes are studied to outline a tendency towards landscape affection as a basis

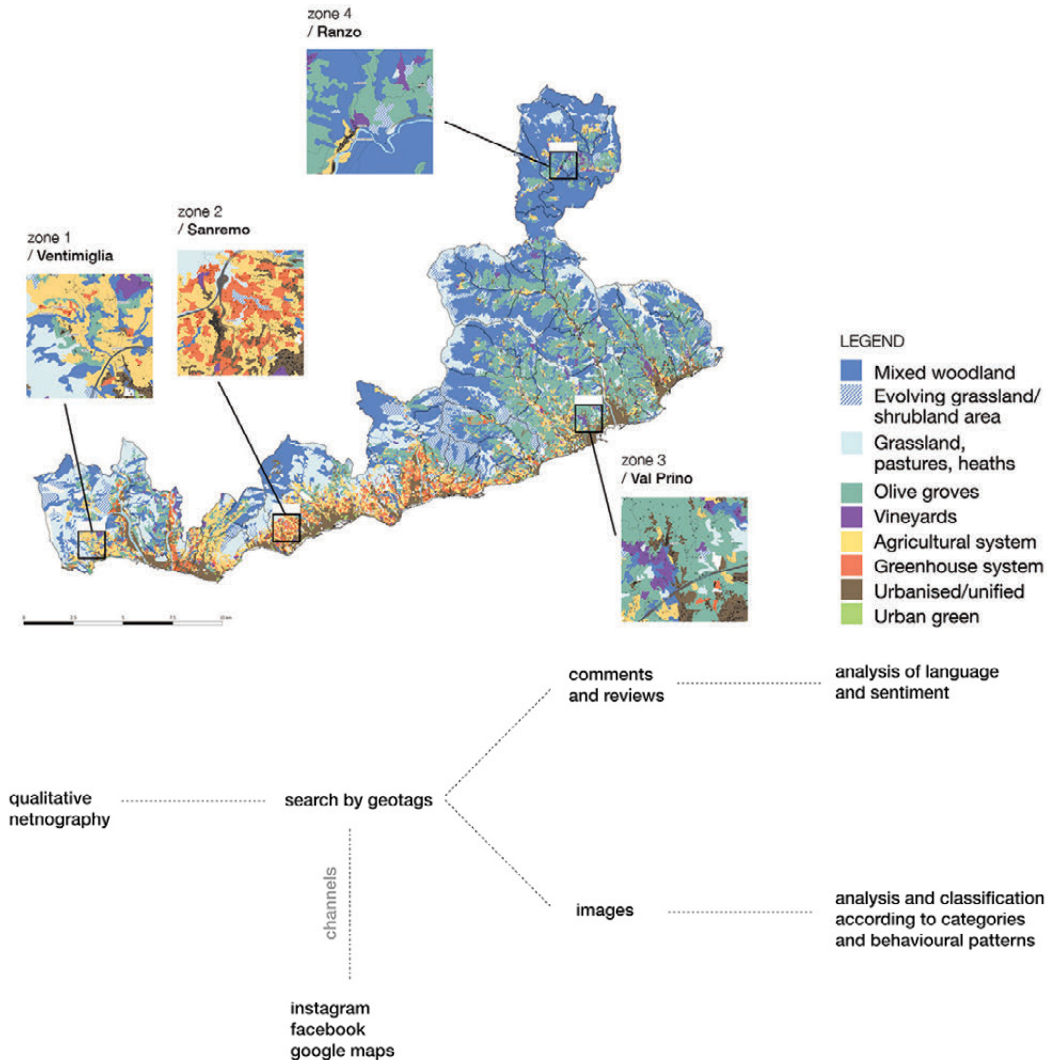


Fig. 5 | Analysis and categorisation of the diversity of Ligurian landscapes.

Fig. 6 | Outline of methodological approach and netnographic steps adopted in the project.

Fig. 7 | Example of image type analysis according to a geotag's categories, habits and behavioural patterns for which 105 images were identified and analysed. The percentages correspond to landscape 29.5%; places of cultural interest 10%; cycling and motocross 5.7%; nature 2.8%; itineraries 3.8%; selfies and group photos 25.7%; selfies during biking/trekking 21.9%; other 0.6%.

Liguria	Piedmont	
<p>1 / Imperiese diversified territory, imbalance between the over-exploited coastline and the neglected hilly hinterland</p> <p>1.1 / Border landscape French border, rugged coastline, few cultivations, historic villas and gardens</p> <p>1.2 / Mosaic of crops the hilly landscape, horticultural and floricultural crops. greenhouses and terracing</p> <p>1.3 / The Five Valleys of Olives olive groves of the taggiasca variety cultivated in thickets, valleys, historic hilltop villages</p> <p>1.4 / Media Valle Arroscia transition between cultivated valley (olive groves, orchards and vineyards) and mountain landscape, border with Piedmont</p>	<p>2 / Alta Val Tanaro mountain area with pastures, coniferous and deciduous woods, chestnut groves and some terracing (border with Liguria)</p> <p>2.1 / Alpine landscape Mountain ranges with limestone rocks, coniferous forests and mountain pastures</p> <p>2.2 / Beech and chestnut landscape beech forests, pastures and terraces, former wool and cotton mills</p>	<p>3 / Alta Langa hilly territory, characterised by cultivated land along the ridges and by woods in the impluvium</p> <p>3.1 / Wine landscape the rows of vineyards draw geometries on the hillsides</p> <p>3.2 / Hazelnut landscape hazelnut groves and hazelnut farms, impluvium forests</p> <p>3.3 / Rural landscape pastures, cultivation of ancient grains, lavender and other aromatic plants, historical villages</p>
<p>7 Balconies</p> <p>/ Ventimiglia alta (gardens and historic routes)</p> <p>/ bend above Coldirodi (greenhouses)</p> <p>/ Castellaro (among olive groves, greenhouses and vineyards)</p> <p>/ Santa Brigida (between olive groves and high pastures)</p> <p>/ Monte Acquarone (between the Prino and Impero valleys)</p> <p>/ Diano Castello</p>	<p>5 Balconies</p> <p>/ Caprauna (panorama of Liguria)</p> <p>/ Viozene (Ligurian Alps)</p> <p>/ Ormea</p> <p>/ Garessio (mid-coast route terraces and historic centre)</p> <p>/ Colle di Casotto (chestnut groves)</p>	<p>6 Balconies</p> <p>/ Sale S. Giovanni (lavender and ancient grains)</p> <p>/ Torresina – Belvedere Langhe (woods and truffles)</p> <p>/ Murazzano S. Benedetto Belbo (pastures)</p> <p>/ Feisoglio – Cravanzana (hazel groves)</p> <p>/ Cortemilia (terracing)</p> <p>/ Trezzo Tinella (muscatel)</p>

Tab. 1 | The narrative structure of the landscapes of the Pays Aimables Project study areas (Imperiese, Alta Val Tanaro and Alta Langa).

for a design strategy that integrates the on-site experience with the digital one (Parente and Sediti, 2018) through a 'phygital' narrative. It highlights the focal points, opportunities and challenges related to landscape features captured and shared by people.

The netnographic method, which has among its methodological advantages to propose a qualitative analysis based on co-creation, advanced messaging tools and emergent data within online communities and social media (Costello, McDermott and Wallace, 2017), provides users not only a way to represent themselves but also with the possibility to leave a dynamic trace of their relationship with places.

It envisages quick and inexpensive monitoring of online communities compared to other methods (de Valck, van Brugge and Wierenga, 2009), avoiding, for example, the limitations of filling out questionnaires (Gupta, 2009), incorporating a margin of spontaneity in the narrative and relational modes of expression into the analysis, without intervening within the community, and providing valuable insights (Pollok, Lüttgens and Piller, 2014). The cultural data analysis of social media and online communities through netnographic reading (Kozinets, Dolbec and Earley, 2014) allows for deeper insights

into how online communities live and communicate specific strategic locations, returning maps and content to be shared. The two methodological readings involved sharing evaluations through meetings with local experts and interviews with testimonials (Gasparotto et alii, 2021).

Having identified the elements that express an efficient synthesis of the different landscapes, the communication to users passes through the selection of itineraries connecting the notable places to which virtual contributions and indications of possible real experiences are attached. The itinerary and the balconies thus offer an immersive experience – analogue and digital – that links the landscape to local traditions and crosses the point of view of those who live in the places with that of those who explore them, providing the opportunity for an experiential tourism alternative to the overcrowding of the better-known areas, thanks to the contribution of the local communities that constitutes the most attractive enrichment.

Study phases and applications in the Pays Aimables project | During the first phase, the territories involved in the project were subjected to the methodological process of decomposition and re-composition by modules illustrated above, through

which it was possible to highlight the distinctive features and qualities of the landscapes present and the different levels of knowledge and appreciation of the places (Figg. 5-7). A prevalent theme was subsequently attributed to each landscape, despite its rich diversity, resulting from the synthetic interpretation of the emerging features and aiming at more effective communication, as illustrated in Table 1. The development and tourist enhancement of lesser-known Ligurian or Piedmontese territories is often better able to showcase their cultural qualities (Zoppi, 2017), including through appropriate technical-political strategies in agreement with local communities.

As for Liguria, an alternative route to the Aurelia and the motorway is more inland and reaches the various balconies from which it is possible to see the types of landscapes compared (Figg. 8-10). Along the Upper Tanaro Valley, the route follows the mountain valley and gets to the most interesting panoramic balconies, as far as the Alta Langa, characterised by the particular morphology of the hills shaped by erosion, where the route breaks up into a network of paths, which follow the ridges towards the panoramic viewpoints (Figg. 11-13).

A digital travel book is available for online consultation⁶ and through an application on mobile phones to help visitors discover the landscapes: both constitute a navigator which, through images and text, directs visitors to the balconies and narrates their peculiarities, suggests the various experiential activities available and indicates possible places to stop for food or sleep; in addition, the video interview of a local testimonial enriches the proposal with a significant cultural contribution.

A dynamic and implementable structure: potentials and limitations | The proposed narrative structure features a participatory approach and flexibility that relates to local communities as protagonists in the narration, starting from scientific assumptions of analysis and use of innovative technologies. Together with the digital devices already mentioned, the strategy in the area proposed promotional artefacts be installed on-site with the presentation of the project and the map with the vantage points to be explored (Fig. 14); a link to the travel book also allows for future integrations, giving the possibility of extending participation to other local stakeholders: on the one hand, the narrative could be enriched with new elements, while the offering is further expands with new stakeholders, itineraries and vantage points. Although the landscape narrative structure targets small local communities with limited economic resources, the involvement of local stakeholders can be a supportive strategy for the care of the territories, activating a network of collaboration and mutual valorisation between the different actors.

The result was, however, only partially achieved. The practical experimentation within the three territories revealed certain limits, linked mainly to the difficulty of managing the implementation process; as an example, the interviews, essential in the narration of the places, fell by the wayside during the transfer of the contents into the travel book due to translation difficulties and to avoid justifying the choice of witnesses; the project's promotion expectations also fell by the wayside, limiting the dissemination of the results and making the structure of the narrative static. Such limitations relate to the

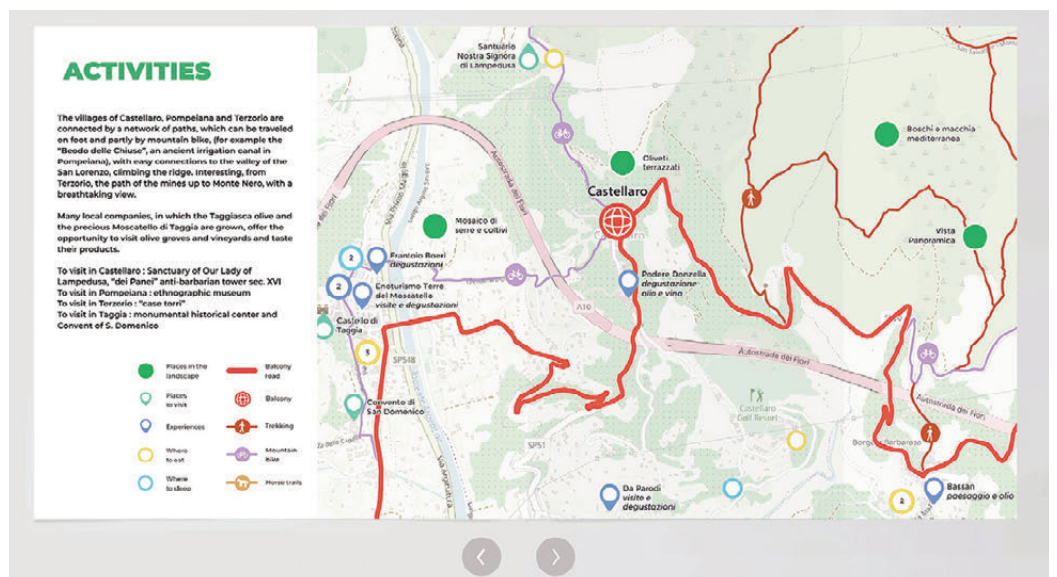
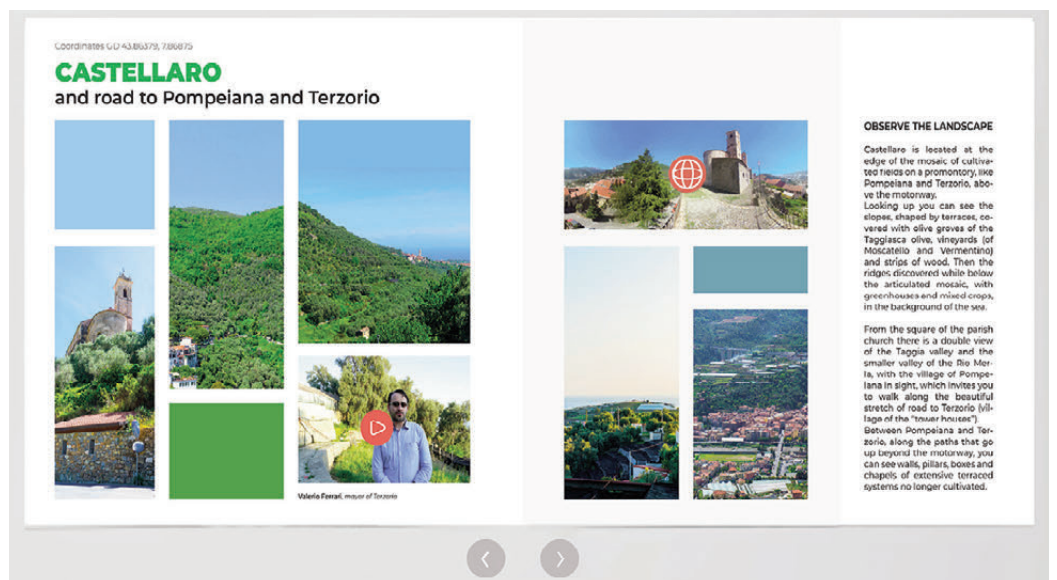


Fig. 8 | Itinerary and balconies in the Imperiese region of Liguria.

Fig. 9 | Interactive travel e-book mockup: example mood-board for the balcony 'Castellaro and road to Pompeiana and Terzorio', Liguria.

Fig. 10 | Interactive travel e-book mockup: activity detail and map of the balcony 'Castellaro and road to Pompeiana and Terzorio', Liguria.



dynamic aspect that most characterises the theoretical approach and which would be interesting to experiment with in other contexts. The first interpretive structure to build the travel book is a starting point of a process that could lead to further improvements in teamwork between operators. In the future, it would be interesting to extend the experimentation or continue involving workers in real tourism promotion.

Concluding remarks on model replicability |

Travelling across the landscape with an itinerary marked by places of interest offers a replicable narrative model, which aims to enhance landscape resources about local traditions and tourist sentiment. However, an in-depth reading of the complexity of landscapes requires an understanding of each context's specificities, concerning which identifying the salient elements as modules of a material and immaterial narrative makes it possible to share and communicate even little-known landscape values. Despite its implementation limitations, the Pays Aimables project's replicability is proven through the interest of French partners, who have adopted its model.

Compared to consolidated reading methodologies, the work gives back centrality to local actors, the research's key focus, targeting an ongoing storytelling enrichment thanks to digital technologies. Through this narrative structure, which proposes 'slow tourism' and immersive experiences, it is possible to implement authentic territorial promotion strategies and initiate collaboration processes with local operators and experts. In future applications, the ability to involve local administrations more closely, building interactions with all stakeholders, should be a proper communication tool between parties, not just the result of a European project that has ended and is not in use any more.

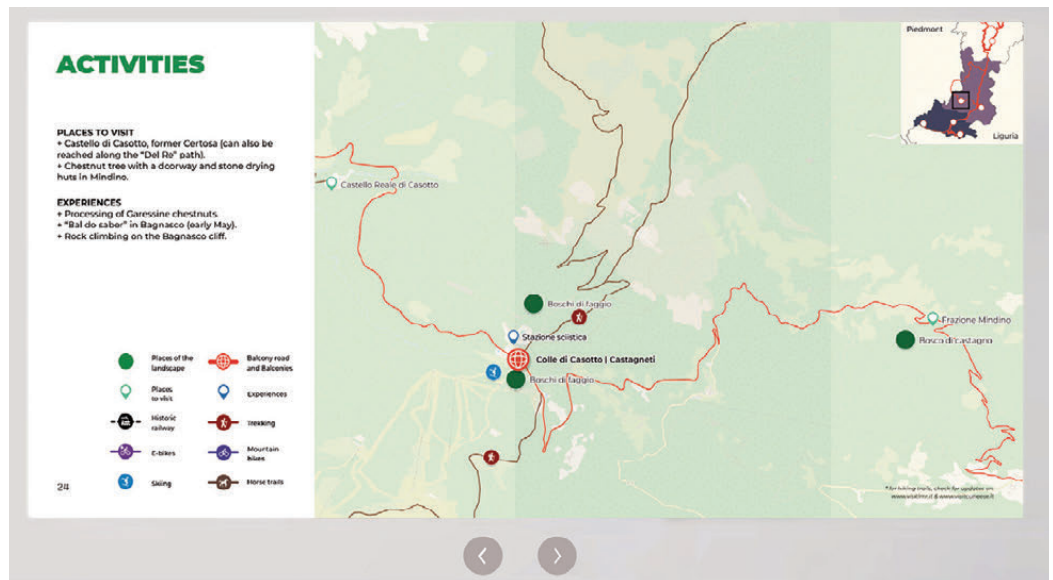
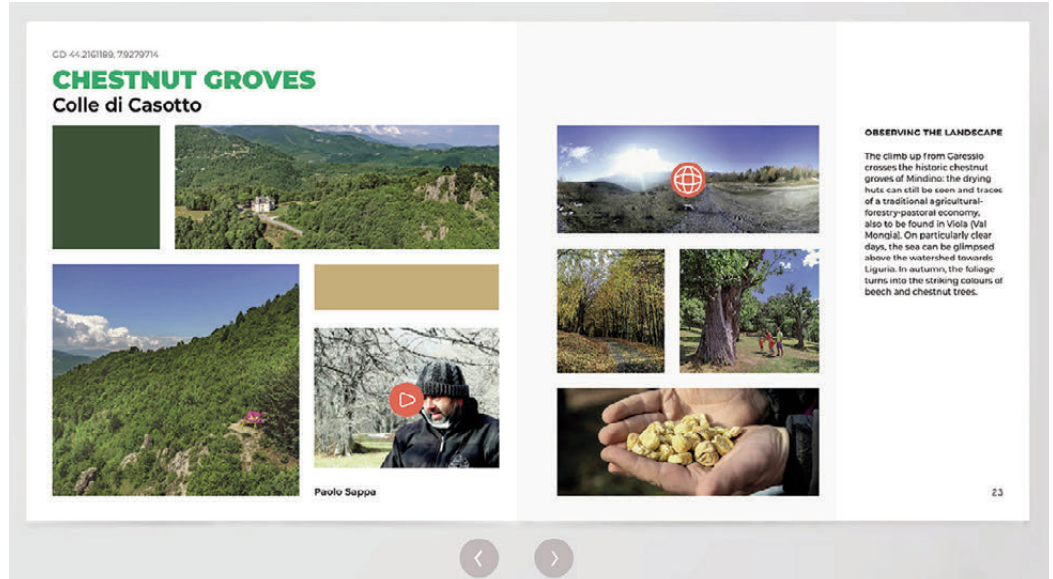


Fig. 11 | Itinerary and balconies in Piedmont, Alta Val Tanaro and Alta Langa.

Fig. 12 | Interactive travel e-book mockup: Example moodboard for balcony 'Colle di Casotto, Chestnut groves', Piedmont, Val Tanaro.

Fig. 13 | Mockup interactive travel e-book: activity detail and map for balcony 'Colle di Casotto, Chestnut groves', Piedmont, Val Tanaro.

Fig. 14 | Area communication strategy: postcard, panel and 360° photo.

Notes

1) The concept of ‘overtourism’, introduced in 2016 in a tourism magazine about Iceland, has, in less than two years, become one of the most discussed topics in the popular media and, increasingly, in academia.

2) The Pays Aimables project, within the EU-funded Interreg-Alcitra Piter Pays Sages Programme, involves a partnership comprising French and Italian local and supra-local authorities.

3) For further information, see the website: visitdolomites.com/balconi-panoramici [Accessed 10 October 2023].

4) Alongside the more established references to environmental factors and the more explored techniques of ‘signage’ and ‘layout’, the human aspect is a fundamental part (Quintal, Thomas and Phau, 2015; Bruwer and Gross, 2017) to add cultural and testimonial values, such as in the case of the ‘winescape’ (Johnson and Bruwer, 2007).

5) For further information on the UNESCO Chair Workshop – Generative Narrative and Mediterranean Landscapes, within the framework of the UNESCO Site Management Plan of the Sassi di Matera, see the website: materunescochair.it/ [Accessed 10 October 2023].

6) For further information, see the website: paysaimables.eu [Accessed 10 October 2023].

References

- Authier, M. and Lévy, P. (2000), *Gli alberi di conoscenze – Educazione e Gestione Dinamica delle Competenze*, Feltrinelli, Milano.
- Bakhshi, H. and Throsby, D. (2012), “New technologies in cultural institutions – Theory, evidence and policy implications”, in *International Journal of Cultural Policy*, vol. 18, issue 2, pp. 205-222. [Online] Available at: doi.org/10.1080/10286632.2011.587878 [Accessed 10 October 2023].
- Baró Zarzo, J.-L., Poyatos Sebastián, J. and Martínez Martínez, N. (2020), “Contrastare lo spopolamento nell’entroterra della Spagna – Proposte tra Arte, Design e Architettura | Fighting against depopulation in inland Spain – Alternatives from Art, Design and Architecture”, in *Agathón | International Journal of Architecture*, vol. 8, pp. 138-147. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8132020 [Accessed 10 October 2023].
- Bernardini, C. and De Mauro, T. (2005), *Contare e raccontare – Dialogo tra due culture*, Laterza, Bari.
- Bocchi, E., Latini, L. and Szanto, C. (2014), “Dietro il paesaggio – Misura e ritmo di una strada tra le colline e il Piave”, in Cozza, C. and Valente, I. (eds), *La freccia del tempo – Ricerche e progetti di architettura delle infrastrutture*, Pearson, Milano-Torino, pp. 155-158.
- Blandin, P. and Lamotte M. (1988), “Recherche d’une entité écologique correspondant à l’étude des paysages – La notion d’écocomplexe”, in *Bulletin écologique*, vol. 19, n. 4, pp. 547-555. [Online] Available at: patrickblandin.com/wp-content/uploads/2019/02/BLANDIN_93.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Bruwer, J. and Gross, M. J. (2017), “A multilayered macroapproach to conceptualizing the winescape construct for wine tourism”, in *Tourism Analysis*, vol. 22, issue 4, pp. 497-509. [Online] Available at: doi.org/10.3727/108354217X15023805452059 [Accessed 10 October 2023].
- Castelnuovi, P. (2012) “Turismo per il paesaggio? | Tourism for landscape?”, in *Ri-Vista | Research for Landscape Architecture*, vol. 17, pp. 19-27. [Online] Available at: oaj.fupress.net/index.php/ri-vista/article/download/2692/2692/ [Accessed 10 October 2023].
- Colafranceschi, D. (2020), “Paesaggi di-segni, geo-grafie emozionali”, in *Ri-Vista | Research for Landscape Architecture*, vol. 18, issue 2, pp. 68-79. [Online] Available at: doi.org/10.13128/rv-9639 [Accessed 10 October 2023].
- Colombo, E. (2020), *Turismo mega trend – Smart destination e turismo digitale – AI, Blockchain, Cyber, IoT e 5G*, Hoepli, Milano.
- Colombo, E. and Marasco, A. (2020), “Esperienze e modelli di servizio per l’innovazione digitale nel turismo culturale”, in Morvillo, A. and Becheri, E. (eds), *Dalla crisi alle opportunità per il futuro del turismo italiano*, Supplemento alla XXIII Edizione del Rapporto sul Turismo Italiano, Rogiosi Editore, Napoli, pp. 95-114. [Online] Available at: iriss.cnr.it/wp-content/uploads/2020/06/Supplemento-alla-XXIII-Edizione-del-Rapporto-sul-Turismo-Italiano.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Colonna, A. (2015), *Genealogia del presente e storiografia dell’architettura – Appunti dalla didattica e per la ricerca*, Calebasse, Potenza. [Online] Available at: materunescochair.it/wp-content/uploads/2020/03/BIBLIO_4_A.-Colonna-Genealogia-del-presente-e-storiografia-dell-architettura.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Costello, L., McDermott, M.-L. and Wallace, R. (2017), “Netnography – Range of Practices, Misperceptions, and Missed Opportunities”, in *International Journal of Qualitative Methods*, vol. 16, issue 1, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1177/1609406917700647 [Accessed 10 October 2023].
- de Valck, K., van Bruggen, G. H. and Wierenga, B. (2009), “Virtual communities – A marketing perspective”, in *Decision Support Systems*, vol. 47, issue 3, pp. 185-203. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.dss.2009.02.008 [Accessed 10 October 2023].
- Fumo, M. (2019), “Paesaggi culturali – Artificio tra resilienza e selezione naturale | Cultural landscapes – Artificial between resilience and natural selection”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 6, pp. 36-45. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/642019 [Accessed 10 October 2023].
- Gasparotto, S., Bosco, A., Lengua, M. and Baruzzi, P. (2021), “MEET – Un percorso espositivo interattivo tra co-design e valorizzazione del territorio | Meet – An interactive exhibition itinerary between co-design and enhancement of the territory”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 10, pp. 242-249. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/10222021 [Accessed 10 October 2023].
- Gherisi, A., Pericu, S., Delprino, F. and Melli, S. (2022), “Pays Aimables – Visual storytelling and landscape values”, in Gambardella, C. (ed.), *Beyond all Limits – International Conference on Sustainability in Architecture, Planning, and Design*, Dadi Press, pp. 424-428. [Online] Available at: beyondalllimits22.com/proceedings/ [Accessed 10 October 2023].
- Gupta, S. (2009), “How do consumers judge celebrities’ irresponsible behavior? An attribution theory perspective”, in *Journal of Applied Business and Economics*, vol. 10, pp. 1-14. [Online] Available at: digitalcommons.www.na-businesspress.com/JABE/Jabe103/GuptaWeb.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Herren, F. (2019), “National Tourist Routes Project in Norway – Architecture and Artworks to Rest, Recollect, and Reflect”, in *Oncurating*, vol. 41, pp. 43-50. [Online] Available at: on-curating.org/files/oc/dateiverwaltung/issue41/PDF_to_Download/Oncurating41_WEB.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Ingegnoli, V. (2011), *Bionomia del Paesaggio – L’ecologia del paesaggio biologico-integrata per la formazione di un medico dei sistemi ecologici*, Springer-Verlag, Milano. [Online] Available at: link.springer.com/book/10.1007/978-88-470-2041-2 [Accessed 10 October 2023].
- Jakob, M. (2022), *Le origini tecnologiche del paesaggio*, LetteraVentidue, Siracusa.
- Johnson, R. and Bruwer, J. (2007), “Regional brand image and perceived wine quality – The consumer perspective”, in *International Journal of Wine Business Research*, vol. 19, issue 4, pp. 276-297. [Online] Available at: doi.org/10.1108/17511060710837427 [Accessed 10 October 2023].
- King, L., Stark, J. F. and Cooke, P. (2016), “Experiencing the Digital World – The Cultural Value of Digital Engagement with Heritage”, in *Heritage & Society*, vol. 9, issue 1, pp. 76-101. [Online] Available at: doi.org/10.1080/2159032X.2016.1246156 [Accessed 10 October 2023].
- Kozinets, R. V., Dolbec, P.-Y. and Earley, A. (2014), “Netnographic analysis – Understanding culture through social media data”, in Flick, U. (ed.), *The SAGE Handbook of Qualitative Data Analysis*, Sage, London, pp. 262-276. [Online] Available at: doi.org/10.4135/9781446282243 [Accessed 10 October 2023].
- Lai, F. (2004), *Antropologia del paesaggio*, Carocci, Roma.
- Magnaghi, A. (ed.) (2001), *Rappresentare i luoghi – Metodi e tecniche*, Alinea, Firenze.
- Morelli, E. (2005), *Disegnare linee nel paesaggio – Metodologie di progettazione paesistica delle grandi infrastrutture viarie*, University Press, Firenze, Firenze. [Online] Available at: doi.org/10.36253/88-8453-293-0 [Accessed 10 October 2023].
- Parente, M. and Sedini, C. (2018), *D4T – Design per i Territori – Approcci, metodi, esperienze*, ListLab, Trento.
- Pollok, P., Lüttgens, D. and Piller, F. T. (2014), *Leading edge users and latent consumer needs in electromobility – Findings from a netnographic study of user innovation in high-tech online communities*, RWTH-TIM Working Paper, February 2014. [Online] Available at: dx.doi.org/10.2139/ssrn.2412081 [Accessed 10 October 2023].
- Quintal, V. A., Thomas, B. and Phau, I. (2015), “Incorporating the winescape into the theory of planned behaviour – Examining ‘new world’ wineries”, in *Tourism Management*, vol. 46, pp. 596-609. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.tourman.2014.08.013 [Accessed 10 October 2023].
- Raajpoot, N. A. (2002), “Tangserv – A Multiple Item Scale for Measuring Tangible Quality in Food Service Industry”, in *Journal of Foodservice Business Research*, vol. 5, issue 2, pp. 109-127. [Online] Available at: doi.org/10.1300/J369v05n02_08 [Accessed 10 October 2023].
- Roussou, M. (2008), “The components of engagement in virtual heritage environments”, in Kalay, Y. E., Kvan, T. and Affleck, J. (eds), *New Heritage – New media and cultural heritage*, Routledge-Taylor and Francis, London and New York, pp. 225-241. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9780203937884 [Accessed 10 October 2023].
- Sbordone, M. A. and Veneziano, R. (2007), *Designscape – Progettare per i paesaggi produttivi*, Alinea, Firenze.
- Turri, E. (2010), *Il paesaggio e il silenzio*, Marsilio, Venezia.
- Turri, E. (1998), *Il paesaggio come teatro – Dal territorio vissuto al territorio rappresentato*, Marsilio, Venezia.
- Tuzzolino, G. F. (2012), *La misura e lo sguardo – L’architettura nel paesaggio delle differenze*, Libria, Melfi.
- Venturi Ferriolo, M. (2007), “Cardada by Paolo Burgi – The Experience of the Gaze”, in Conan, M. (ed.), *Contemporary Garden Aesthetics, Creations and Interpretations*, Dumbarton Oaks, Washington (DC), pp. 199-221.
- Villari, B. (2012), *Design per il territorio – Un approccio community centred*, FrancoAngeli, Milano.
- Zagari, F. (2006), *Questo è paesaggio – 48 definizioni*, Mancosu, Roma.
- Zoppi, M. (2017) “Di Paesaggi, di Miti e di Artefatti | Landscapes, Myths and Artifacts”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 2, pp. 31-38. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/242017 [Accessed 10 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	10 September 2023
Revised	10 October 2023
Accepted	19 October 2023
Published	31 December 2023

MODULARE LE DINAMICHE URBANE IN CHIAVE CLIMATICA

Spazi intermedi e neutralità climatica

MODULATING URBAN DYNAMICS FROM A CLIMATE PERSPECTIVE

In-between spaces and climate neutrality

Fabrizio Tucci, Paola Altamura, Maria Michaela Pani

ABSTRACT

Il contributo presenta gli esiti di una ricerca che interpreta gli spazi intermedi come sistema modulare strutturante lo spazio, le relazioni e le dinamiche urbane in chiave climatica, con l'obiettivo di dimostrare l'apporto positivo che la progettazione tecnologico-ambientale, nell'ambito di interventi di riqualificazione e nuova costruzione del tessuto urbano, può offrire rispetto alle prestazioni ecologiche dell'intero sistema urbano, in particolare in ottica di decarbonizzazione e mitigazione climatica. La ricerca ha sviluppato una metodologia di classificazione e analisi degli spazi intermedi, oltre che un metodo di valutazione della riduzione delle emissioni climalteranti. Il paper confronta sei casi studio rappresentativi delle tre categorie di spazi intermedi individuate, valutandoli attraverso i criteri di Naturalità, Prossimità e Circolarità e in rapporto ai sei assi strategici delle Green City.

This contribution presents the results of a study that interprets in-between spaces as a modular system which structures space, relationships, and urban dynamics from a climate perspective. The aim is to demonstrate the positive contribution that technological-environmental design can offer in the context of redevelopment and new construction of the urban fabric, concerning the ecological performance of the entire urban system, particularly from the perspective of decarbonisation and climate mitigation. Within this research, a methodology for classifying and analysing in-between spaces was developed, as well as a method for evaluating the reduction of climate-altering emissions. The paper compares six case studies that represent the three identified categories of in-between spaces, evaluating them through the criteria of Naturalness, Proximity and Circularity and in relation to the six strategic axes of Green Cities.

KEYWORDS

spazi intermedi, spazio pubblico, cambiamento climatico, ecodistretto, decarbonizzazione

in-between spaces, public space, climate change, eco-district, decarbonisation

Fabrizio Tucci, Full Professor of Architecture Technology at 'Sapienza' University of Rome (Italy), is the Director of the Department of Planning, Design, Technology of Architecture (PDTA), the Director of the II-level Master's in Environmental Technological Design and Coordinator of the Environmental Technological Design Curriculum of the PDTA PhD Program. With 25 years of experience as a Scientific Director for national and international projects and research, he is the Coordinator of the States General of the Green Economy in Architecture and the International Experts Group of the Green City Network. E-mail: fabrizio.tucci@uniroma1.it

Paola Altamura, Architect and PhD, is a Researcher at the PDTA Department of 'Sapienza' University of Rome (Italy). A former Research Fellow at ENEA in the Laboratory Resources Valorization, she carries out research and experimentation on the ecological effectiveness of interventions on the built environment with a focus on circularity, resource efficiency and decarbonisation. E-mail: paola.altamura@uniroma1.it

Maria Michaela Pani, Architect and PhD Candidate at the PDTA Department of 'Sapienza' University of Rome (Italy), holds a Master's Degree in Valorisation and Enhancement of Small Historical Centres. Her research focuses on the role of in-between spaces from the perspective of city sustainability and strategies aimed at climate neutrality in urban districts. E-mail: mariamichaela.pani@uniroma1.it



Le sfide con cui la città contemporanea si confronta sono molteplici, tra le quali le più urgenti sono la crisi climatica e la scarsità delle risorse. Nonostante gli impegni sottoscritti a livello mondiale, siamo ancora lontani dal raggiungere gli obiettivi di contenimento del riscaldamento globale entro 1,5 °C, stabiliti nell'Accordo di Parigi del 2015 (UNFCCC, 2021), e di riduzione del 55% delle emissioni di gas serra entro il 2030, proposti nel Green Deal europeo e nell'Agenda 2030 (European Commission, 2019; UN, 2015). Intervenire sulle città in ottica di sostenibilità e neutralità climatica è fondamentale: esse ospitano circa la metà della popolazione globale e, pur occupando soltanto il 3% della superficie terrestre, sono responsabili del 70% del consumo energetico e del 75% delle emissioni di CO₂, necessitando di infrastrutture socioeconomiche e produttive che arrivino a richiedere in termini di risorse aree di supporto fino a 300 volte superiori alla dimensione fisica (UN, 2015). L'isola di calore urbana, l'alta densità abitativa, il fabbisogno energetico crescente e le emissioni dovute al trasporto, quindi, si amplificano (Tucci, 2018; Losasso, 2022).

L'obiettivo della ricerca è indagare le potenzialità e il ruolo strategico degli spazi intermedi nella transizione delle città verso la neutralità climatica. Gli spazi liminali, intermedi, spesso sinonimo di assenze, vuoti e scarti tra le forme degli oggetti (Piccinno and Lega, 2013) possono essere visti come oggetti effimeri, ma anche come uno straordinario campo di lavoro e di sperimentazione per un possibile futuro 'green' delle città (Rahmann and Jonas, 2011; Tucci, 2018): seppur spesso trascurati, sono teatro di cambiamenti nella gestione vivace della vita quotidiana, hanno un ruolo mesoclimatico e migliorano la connessione tra parti di città e tra gli stessi abitanti.

Attraverso il progetto tecnologico-ambientale di tali spazi è possibile infatti contribuire a modulare le dinamiche urbane e a migliorare la qualità ambientale, rendendo i luoghi più sicuri, fruibili e qualificati, riuscendo anche a supportare un uso efficiente e circolare delle risorse (Tucci et alii, 2021; Marrone and Montella, 2022). Ad esempio l'Eco-boulevard a Madrid¹ introduce strutture bioclimatiche disposte lungo il viale che connette al Parque Nautilus, offrendo oltre alle aree di sosta e socialità, un dispositivo che impatta attivamente (anche attraverso la produzione energetica da rinnovabili) e positivamente sul microclima circostante (Fig. 1). Un ulteriore caso internazionale di rilievo è a Seoul: Seoulo 7017² ha come perno la riqualificazione di una strada sopraelevata carrabile degli anni '70 in una infrastruttura verde pedonale di collegamento cittadino (Fig. 2) e connessione tra le aree verdi urbane.

La ricerca mira a spostare il valore semantico del termine 'intermedio' da spazi di scarto di altri sistemi (trasporti, edificato, ecc.) a sistema modulare strutturante lo spazio e le relazioni, per una gestione ottimizzata e sostenibile dei flussi di risorse che li attraversano. Lo spazio intermedio si configura infatti come elemento connettivo e unificante nella rigenerazione delle città in ottica di sostenibilità e neutralità climatica, «[...] diventa luogo d'interfaccia tecnologico ambientale per mediare e regolare le interazioni fra utenti, fattori, agenti, funzioni, spazialità, tempi, modi d'uso, mezzi, strumenti, quantità, elementi e oggetti tecnici» (Angelucci, 2023, p. 33). L'apporto derivante dal-

l'attuazione di strategie di decarbonizzazione, praticabili attraverso la progettazione tecnologico-ambientale integrata e multiscale di tali spazi, influisce significativamente sulle prestazioni ecologiche dell'intero sistema urbano.

Di rilievo in questa ottica sono le esperienze degli ecoquartieri nel mondo, in particolare quelli di area europea che hanno, tra i loro pilastri, la decentralizzazione e la mixité dei sistemi energetici, fisici e relazionali (Bögel et alii, 2021), secondo un modello di prossimità, rafforzato dopo la recente esperienza globale dei lockdown, evidenziando l'importanza dei rapporti tra edificato e spazi aperti di comunità. Concetti come la città dei 15 minuti e modelli basati sulla prossimità e la mixité (Moreno et alii, 2021) diventano la base per un nuovo livello di organizzazione modulare dei distretti urbani.

Secondo la filosofia del 'crono-urbanismo' (Moreno, 2019) possiamo identificare un modulo spaziale nella distanza percorribile a piedi, in bicicletta o attraverso il trasporto pubblico, riportando le misurazioni a parametri umani legati a tempo e spazio che, tra i primi, era stato indagato da Thomas Herzog e applicato in via sperimentale nel progetto della Solar City Linz-Pichling realizzato nella seconda metà degli anni '90 (Herzog and Steckeweh, 2000). La pedonabilità, oltre ad essere la modalità di trasporto più naturale (Gehl, 2017), è la forma più ampiamente accessibile e universale di attività fisica, contribuendo alla salute generale e benessere degli abitanti delle città (Lee and Buchner, 2008).

Questi spazi, vocati alla trasformazione nel tempo, possono migliorare il livello di resilienza delle città, grazie alla combinazione di architettura adattiva e integrazione con le tecnologie 'responsive', entrando in dialogo attivo con l'ambiente circostante (Andaloro, de Waal and Suurenbroek, 2022). L'interpretazione dello spazio intermedio è uno step imprescindibile nella valutazione della vivibilità e sostenibilità della città contemporanea, garantendo un'infrastruttura di continuità e connessioni per luoghi, persone, beni e servizi (De Capua and Errante, 2019).

La ricerca intende offrire una diversa chiave di lettura sulla dimensione degli spazi intermedi urbani, spesso oggetto di indagine in letteratura per la riattivazione dello spazio pubblico, delle comunità, o per le possibilità di mitigazione degli effetti dell'isola di calore urbana. Poche sono infatti le letture trasversali sul potenziale ruolo che tali spazi possono svolgere nella decarbonizzazione delle città, che la ricerca si pone invece l'obiettivo di indagare.

Muovendo dal concetto, consolidato sin dagli anni '80 nell'ambito della Progettazione Ambientale, di spazio intermedio come componente depositaria del controllo e della regolazione di buona parte delle interazioni vitali dell'ecosistema urbano (Tucci, 2023) e alla luce delle molteplici accezioni di significato riconducibili agli spazi intermedi, che oggi ne evidenziano l'elevata complessità³, la ricerca mira, in particolare: a strutturare una classificazione ampia e articolata degli stessi, a individuare e mappare un ampio insieme di esperienze esemplari in cui tali spazi sono stati strutturati – in modo da potenziarne il ruolo in ottica di mitigazione climatica, analizzarne i caratteri secondo un set di criteri specifici – e infine a definire una metodologia per la valutazione del contributo alla decarbonizzazione nei termini (peraltro molto am-

pi, anche se finora troppo poco indagati) che essi possono offrire.

Il contributo presenta i risultati di attività di ricerca svolte nell'ambito della più ampia tematica del PRIN, Bando 2017, dal titolo Tech Start – Key Enabling Technologies and Smart Environment in the Age of Green Economy – Convergent Innovations in the Open Space / Building Systems for Climate Mitigation, da parte dell'Unità di Ricerca del Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura della 'Sapienza' Università di Roma.⁴

Metodologia e fasi operative della ricerca | L'attività di ricerca sistematica si è svolta in cinque fasi, temporalmente distinte. Nella prima fase, attraverso un'approfondita revisione della letteratura⁵, si è definito un metodo di classificazione dell'ampia casistica di spazi intermedi riscontrabili in ambito urbano, dalla scala dell'edificio a quella distrettuale. Spesso trascurati e trattati come non luoghi, vuoti, assenze, spazi di risulta, sono elementi intermedi tra due estremi, e per questo difficilmente inquadrabili e troppo a lungo 'imprigionati' nella logica della 'dualità' o del 'sistema binario' (Carmona, 2010), che pone l'attenzione sugli estremi e non sulle condizioni di transizione – quelle che sono comprese tra quegli estremi – condizioni che rappresentano in realtà la più concreta sede del possibile cambiamento. Non potendo riferirsi unicamente agli aspetti morfologici, in quanto pressoché infinita la casistica che si presenta sulla scena internazionale, ai fini dello studio degli spazi intermedi la ricerca propone un modello di lettura basato sulle quattro dimensioni che li contraddistinguono: la dimensione progettuale, quella socioculturale, quella economico-politica e quella climatica.

Nella dimensione 'progettuale' si evidenzia la funzione e il grado di adattabilità nel tempo e nello spazio (Franck and Stevens, 2006). La dimensione 'socioculturale' è collegata direttamente all'utenza, alla percezione dello spazio e ai tipi di interazioni possibili tra di essi, che li dispongono su una scala che va dal 'vuoto negativo' al 'quotidiano e familiare' (Dines and Cattell, 2006). La dimensione 'economico-politica' riguarda la relazione tra spazio pubblico e privato e le dinamiche di inclusione (Malone, 2002) ed esclusione (Flusty, 1997). Infine, nella dimensione 'climatica' ritroviamo il ruolo di mesoambiente regolativo di Marston Fitch (1980) e gli aspetti di funzionalità bioclimatica (Herzog and Steckeweh, 2000). Tuttavia mentre quest'ultima dimensione è spesso considerata come isolata, la ricerca la interpreta come strettamente correlata alle altre tre dimensioni, indagando in particolare i nessi e le potenziali interazioni tra di esse (Fig. 3).

Nella seconda fase, a partire dalla rispondenza alle caratteristiche emerse nell'analisi delle quattro dimensioni degli spazi intermedi (progettuale, socioculturale, economico-politica e climatica), è stata effettuata la selezione di un centinaio di casi studio nazionali e internazionali, su scala globale, di spazi intermedi urbani, classificati per macrocategorie: gli spazi pertinenti agli edifici, comuni e polifunzionali, sia indoor (come spazi-buffer, atri bioclimatici, spazi condivisi, ecc.) sia outdoor (come corti, patii, ecc.); gli spazi tra gli edifici, inclusi gli spazi interstiziali e quelli pubblici come piazze o strade; le reti di spazi costituite dalla con-

nessione di più spazi pubblici o semipubblici. I casi studio presi in esame derivano da interventi di nuova costruzione e di rigenerazione urbana. I nuovi interventi si riferiscono principalmente alla realizzazione di eco-quartieri ed eco-distretti, mentre gli interventi di rigenerazione e riqualificazione urbana comprendono azioni puntuali, di riempimento dei vuoti residuali sia del tessuto urbano sia dell'edificato.

Successivamente nella terza fase è stata condotta l'analisi di rispondenza dei casi rispetto a sei assi tematici definiti a monte della raccolta e selezione dei casi; quindi si è proceduto alla valutazione degli stessi tramite tre criteri appositamente elaborati, come descritto più avanti. Questa fase ha così avuto la finalità di enucleare le unità di base modulari degli interventi realizzati e comprendere come la progettazione di questi spazi, in ottica tecnologica-ambientale, possa ca-

ratterizzarli in chiave di infrastruttura a supporto di dinamiche urbane in ottica di decarbonizzazione, uso efficiente e circolare delle risorse e tutela degli ecosistemi naturali.

Il primo step della fase di analisi è consistito nella verifica dell'aderenza dei casi studio agli assi delle Green City⁶ (Tucci and Altamura, 2023): 'energy transition', 'bioclimatic responsiveness', 'functional mixity and proximity', 'resource circularity and self-sufficiency', 'sustainable mobility', 'urban greening, green and grey CO₂ subtraction'. In particolare si è adottata una modalità di valutazione qualitativa con una scala da 0 a 5 (con 5 livello massimo) che restituisce la numerosità e il livello di innovazione delle soluzioni adottate in ciascun intervento, in linea con ciascun asse, rispetto alla finalità della riduzione delle emissioni climalteranti.

Il secondo step, poi, è stato orientato alla valutazione dell'impatto della progettazione tecno-

logica-ambientale degli spazi intermedi sul sistema urbano rispetto, in particolare, all'obiettivo della neutralità climatica. Nello specifico si è inteso valutare il potenziale ruolo degli spazi intermedi come modulo strutturante nell'ambito della riqualificazione / rigenerazione del tessuto urbano, attraverso l'elaborazione di tre criteri di analisi, collegati sinergicamente tra loro: Naturalità, Prossimità e Circolarità (Fig. 4).

Per Naturalità, nell'ambito della ricerca, si intendono le strategie collegate all'acqua, al verde e al suolo. La presenza di aree verdi nei distretti urbani è infatti decisiva per il controllo degli effetti dell'isola di calore, l'assorbimento di CO₂, la gestione del deflusso delle acque meteoriche e la resilienza agli eventi climatici estremi, oltre che per garantire benefici psico-fisiologici. Nelle azioni di rigenerazione urbana, le soluzioni integrate basate sulla natura potenziano il ruolo mesoclimatico dello spazio intermedio, aumentano la permeabilità dei suoli, consentono la gestione circolare delle acque piovane e favoriscono la biodiversità e l'attrattiva dello spazio (Scalisi and Ness, 2022).

La Prossimità, intesa come funzione di mixità, trasporto e vivacità della vita, è uno dei punti cardine della modulazione urbana; i tre aspetti sono interdipendenti alimentandosi, o smorzandosi, a vicenda. La mixità funzionale e sociale è spesso definita come entropia, con un valore tanto più alto quanto più è possibile trovare servizi e funzioni diversificate al suo interno (Ewing and Cervero, 2001): dotare gli spazi pubblici di servizi rafforza l'uso della mobilità dolce e consente la costituzione del senso di appartenenza ed identità che porta le persone ad attraversare e sostare in quegli spazi, contribuendo alla crescita e al rafforzamento della loro vitalità (Gehl, 2011). Inoltre la Prossimità si presta come modulo spaziale nella gestione circolare dei flussi di risorse materiali e immateriali, rispondendo alle problematiche del transito da globalizzazione a reti 'glocali' (Bauman, 2005; Andaloro, 2021): l'implementazione di strategie circolari (riuso, riparazione, riciclo) nel ciclo di vita di prodotti e materiali è favorita dalla presenza di luoghi comunitari di promozione di buone pratiche di condivisione e autosufficienza, come i servizi di sharing di biciclette e auto elettriche, aumentandone l'accessibilità e incoraggiandone l'uso.

La quarta fase della ricerca ha visto la messa a punto di una modalità di analisi e restituzione grafica dell'organizzazione spaziale e funzionale degli spazi intermedi, attraverso una mappatura georeferenziata sul software QGis (Figg. 5, 6). L'elaborazione grafica evidenzia le strategie adottate secondo i tre criteri di Naturalità, Prossimità e Circolarità nei singoli casi studio in maniera puntuale, segnalando inoltre la presenza di elementi chiave derivanti dall'implementazione delle singole strategie e individuati durante la fase di analisi.

Nella mappatura gli spazi intermedi vengono relazionati ad aree definite in base a un modulo costruito sulla distanza spazio-temporale degli spostamenti pedonali e ciclabili, rispettivamente di 250 e 500 metri (Nalaskowska, 2021). Il fine della mappatura è di visualizzare il sistema degli spazi intermedi, intesi come infrastruttura, e delle

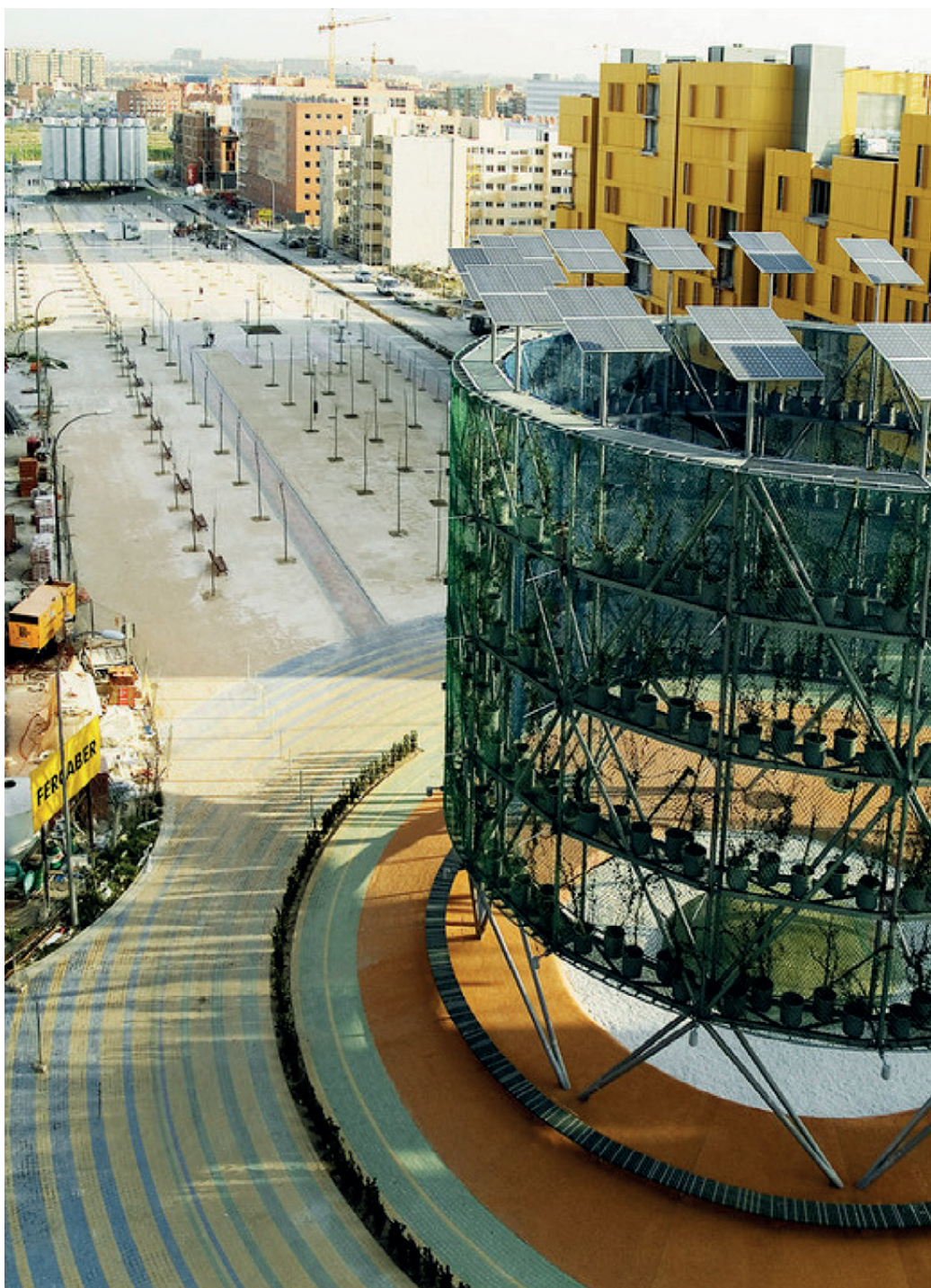


Fig. 1 | Eco-boulevard in Madrid (2007), designed by Eco-sistema Urbano (source: archdaily.com).

reti che li mettono in relazione, per evidenziare come essi collaborino e si integrino in maniera sinergica, nel supporto che offrono alle diverse dimensioni socioculturale, economico-politica, progettuale, climatica.

Infine, la quinta fase della ricerca, che si sta avviando a conclusione, consiste nella definizione di una metodologia per la misurazione dei benefici ambientali – in termini di riduzione delle emissioni climalteranti – conseguibili attraverso l'implementazione negli spazi intermedi delle strategie riconducibili a Naturalità, Prossimità e Circolarità, mediante azioni tecniche e tecnologiche. La metodologia integra diverse metodiche per la stima delle emissioni di CO₂ evitate e/o sottratte attraverso le singole componenti del progetto (trasporti / spostamenti evitati, vegetazione, produzione energetica in loco, gestione circolare e locale degli scarti, gestione circolare della risorsa idrica, ecc.), strutturando un quadro complessivo che consente di comparare lo stato ante e post intervento e di valutare quantitativamente i benefici ottenuti.

Risultati della ricerca | Nella presente sezione sono presentati i risultati della ricerca mediante l'illustrazione di sei casi studio esplicativi delle dinamiche osservate, analizzati attraverso il set di criteri precedentemente descritti (Tab. 1). I casi studio qui riportati sono rappresentativi delle categorie di riferimento già citate.

Nell'ambito degli spazi intermedi pertinenti agli edifici, la mixità funzionale e sociale interna consente l'ottimizzazione dei flussi e la circolarità su breve distanza. Nel caso del Markthal di Rotterdam, l'asse della 'functional mixité and proximity' è espresso fin dalla concezione progettuale: l'edificio per abitazioni si sviluppa attorno a un grande spazio pubblico, circondandolo fisicamente fino a coprirlo e generando uno spazio intermedio sia aperto che chiuso, con diverse funzioni in base agli orari, di giorno mercato e supermercato, di sera principalmente dedicato ad attività di ristorazione. Rispondendo ai criteri di Prossimità e Circolarità, l'edificio favorisce la vitalità del luogo grazie al mix e alle diverse soluzioni di trasporto nelle vicinanze, innescando dinamiche di circolarità di servizi, scarti e prodotti anche con il vicino, e storico, mercato all'aperto (Fig. 7).

Nel grattacielo Capitaspring, Singapore, che si sviluppa su 51 piani caratterizzati dalla presenza di oasi verdi fruibili sia dagli abitanti che dagli utenti esterni, il verde diventa elemento strutturante la distribuzione interna, in risposta al criterio della Naturalità e in rispondenza con l'asse del 'green CO₂ subtraction and urban greening'. Al piano terra la piazza funge da connessione e apertura verso il quartiere: successivamente al blocco delle abitazioni e spazi collettivi è presente una grande oasi verde su più piani, che si ripropone poi in copertura. Il verde, in questo caso, oltre a contribuire al raffrescamento e alla purificazione dell'aria e a offrire una sosta all'interno di una città altamente cementificata, è anche produttivo: gli orti presenti al suo interno riforniscono i numerosi ristoranti presenti nel grattacielo, secondo l'asse della 'resource circularity and self-sufficiency' e innescando un dialogo tra i criteri di Naturalità e Circolarità (Fig. 8).

Con riferimento agli spazi tra gli edifici, interventi puntuali di riempimento dei vuoti urbani residui o rigenerazione urbana, che mirano a rendere i vuoti urbani luoghi positivi e attivi, possono innescare nuove dinamiche nell'intorno favorendo la connessione tra diversi elementi a livello urbano. A Taiwan un centro commerciale in disuso è divenuto una piazza urbana con acqua e verde: Tainan Spring sorge all'interno dei resti della struttura pre-esistente, trasformando l'edificio abbandonato in un'oasi verde con vasche d'acqua, funzionali sia da un punto di vista sociale che bioclimatico, contribuendo a migliorare il microclima circostante secondo l'asse del 'bioclimatic responsiveness'. L'inserimento di un luogo aperto in un contesto densamente costruito ha consentito di migliorare la circolazione e il sistema di trasporti, favorendo le connessioni tra spazi prima non comunicanti,

utilizzando diverse strategie appartenenti ai criteri di Naturalità e Prossimità (Fig. 9).

Nel caso della riqualificazione di Karen Blixens Plads, Copenhagen, la piazza modula gradualmente la transizione fra la zona universitaria e un'area naturalistica, ospitando diversi sistemi ipogei per parcheggiare le biciclette e modellando il terreno in continuità con l'andamento naturale, incidendo direttamente sull'asse della 'sustainable mobility' e integrando soluzioni di Naturalità e Prossimità (Fig. 10).

Riguardo alla categoria delle reti di spazi, la connessione tra diverse tipologie (strade, piazze, corti, tetti, ecc.) genera sistemi continui di fruizione dello spazio, favorendo la connessione con il sistema naturale e la salvaguardia della biodiversità, ottimizzando i percorsi spazio-temporali a favore di una mobilità sostenibile e di uno stile di vita sa-



Fig. 2 | Seoulo 7017 Skygarden (2017) in Seoul, designed by MVRDV (credit: Ossip).

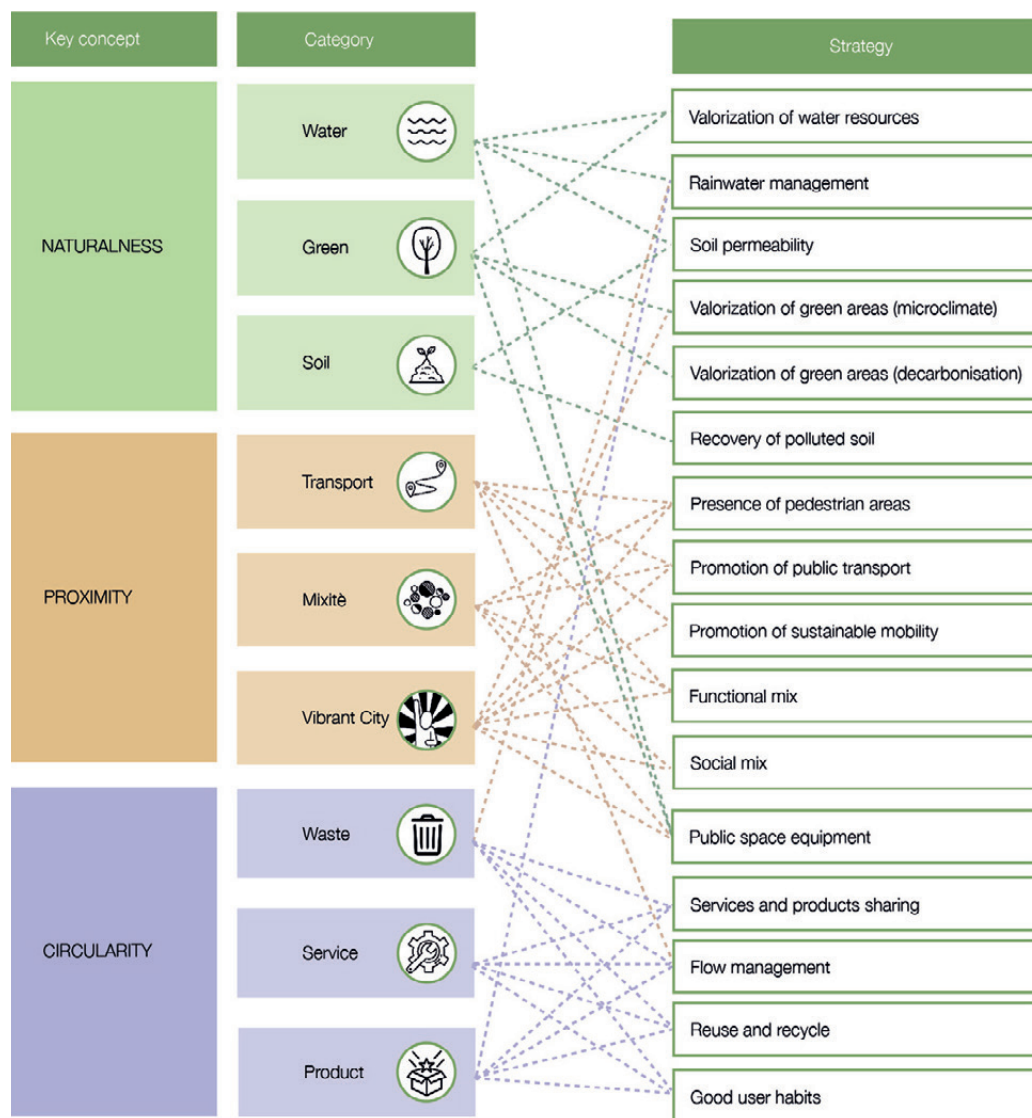
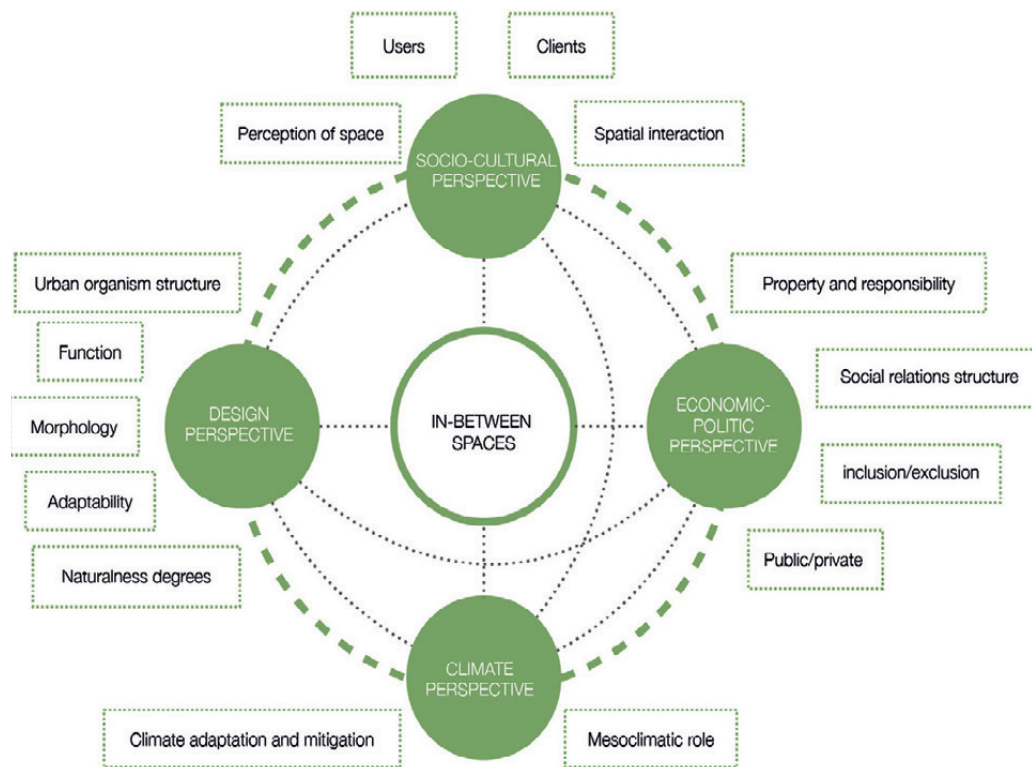


Fig. 3 | The four dimensions of in-between spaces (credit: M. M. Pani).

Fig. 4 | Criteria and categories for analysing the modulation of urban dynamics by in-between spaces (credit: M. M. Pani).

no, offrendo occasioni di recupero riciclo e produzione in loco. Tali approcci si riscontrano in maniera sistemica negli eco-quartieri ed eco-distretti nati nell'ambito di azioni di rigenerazione urbana, laddove è anche più evidente la strutturazione degli spazi intermedi come moduli di organizzazione dello spazio urbano.

A Stoccolma l'ecodistretto Stockholm Royal Seaport, sorto su un'area ex industriale, presenta una forte connessione con la vicina area naturalistica, evidenziata grazie a un'attenta progettazione in base al modulo spazio-temporale che rende fruibile e connesso il distretto nel raggio di 15 minuti. Grande attenzione è data al tema del verde e alla garanzia di spazi verdi accessibili e fruibili da ogni abitazione nel raggio di 300 metri (Fig. 11).

In ultimo il caso dell'ecodistretto Nordhavn a Copenhagen: l'intervento si snoda su 11 isolotti, ognuno dei quali strutturato secondo il principio dei 5 minuti e a sua volta con caratteristiche e attività peculiari che consentono una collaborazione con gli altri anche grazie a un anello di trasporto pubblico e ciclabile. Il modulo spaziale è qui particolarmente evidente, collaborando con quello temporale che invita all'uso degli spazi pubblici diversificato in base agli orari, come la piazza antistante alla scuola internazionale, o invita a un mix di usi come nel caso del parcheggio multipiano Park'n'Play che presenta in copertura un'area attrezzata per attività sportive all'aperto (Fig. 12).

Discussione dei risultati e conclusioni | Dalla lettura comparativa dei casi qui presentati, selezionati a seguito di un'ampia raccolta e analisi di casi studio nazionali che si distinguono per l'innovazione delle soluzioni e dei modelli proposti, la ricerca ha operato una sintesi critica con particolare attenzione alle soluzioni con promettenti ricadute sulla mitigazione climatica e sulla decarbonizzazione. In particolare il quadro di valutazione dell'aderenza dei casi agli Assi delle Green City (Tab. 2) rileva una maggior efficacia nel caso di reti di spazi, integrando più facilmente tutti gli aspetti; la 'energy transition', infatti, non è presente nelle altre categorie, mentre la 'resource circularity and self sufficiency' è variabile; gli altri assi sono ampiamente sviluppati in tutti i casi.

Con riferimento al quadro di valutazione attraverso i criteri di Naturalità, Prossimità e Circolarità (Tab. 3), appare una notevole concentrazione di azioni inerenti alla Prossimità in tutte le categorie, la Naturalità presenta una minore ricorrenza negli spazi di pertinenza agli edifici, mentre la Circolarità è maggiormente implementata a livello di reti e edifici.

In conclusione l'attività di ricerca mostra profili di innovazione nell'individuazione delle molteplici ricadute che il progetto dello spazio urbano, consapevole dell'ottica propria della progettazione tecnologica-ambientale, può offrire rispetto all'obiettivo della neutralità climatica, nel modulare le dinamiche di evoluzione, trasformazione e rigenerazione urbana. Inoltre nella fase più recente di sviluppo della ricerca è stato introdotto un ulteriore aspetto innovativo attraverso la definizione di una metodologia di valutazione quantitativa dell'impatto delle azioni strategiche intraprese negli spazi intermedi rispetto all'obiettivo della neutralità climatica.

In tal senso, rispetto a quest'ultima attività, si individua un limite di ricerca nella difficoltà di mi-

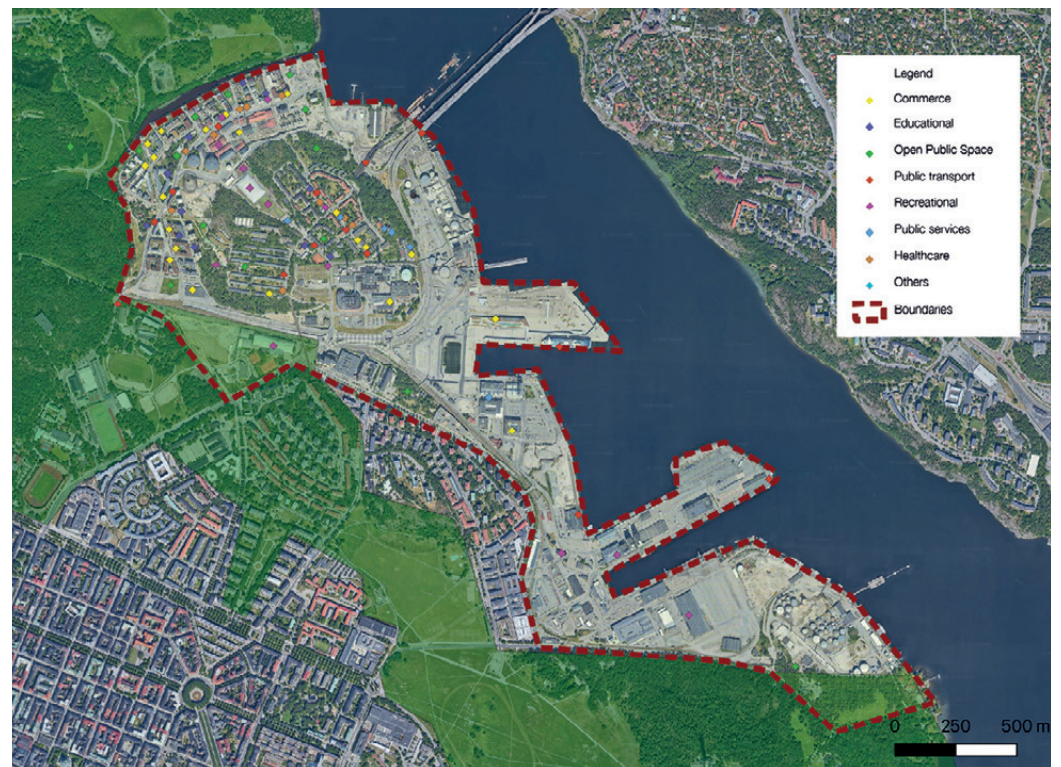
surazione diretta del contributo di alcune delle strategie di decarbonizzazione applicabili negli spazi intermedi (come nel caso delle soluzioni relative all'incremento del mix funzionale); ciò comporta la necessità di articolare la valutazione in diversi passaggi, andando a scomporre l'azione in diverse componenti direttamente valutabili.

Tra le prospettive di ricerca si individua l'opportunità della definizione sistematica di indirizzi, strategie, azioni e soluzioni tecnologiche a supporto della progettazione tecnologica-ambientale degli spazi intermedi in ambito urbano, volti a organizzarli in moduli spaziali che integrino e offrano servizi (ecosistemici e non) e attrezzature coerenti con i concetti chiave di Naturalità, Prossimità e Circolarità. Tale prodotto potrebbe supportare le attività delle Amministrazioni locali nell'indirizzare le azioni sugli spazi intermedi urbani in chiave di neutralità climatica, di adattamento e di riduzione del prelievo di risorse. Rispetto a questa prospettiva si riscontra un limite nella infinita variabilità delle morfologie degli spazi intermedi urbani che può essere affrontata avvalendosi proprio del 'modulo', in rapporto al concetto chiave di Prossimità.

Among the many challenges facing the contemporary city, the most urgent are the climate crisis and the scarcity of resources. Despite global commitments, we are still a long way from meeting the 1.5 °C global warming containment targets set out in the 2015 Paris Agreement (UNFCCC, 2021), and a 55% reduction in greenhouse gas emissions by 2030, as proposed in the European Green Deal and the 2030 Agenda (European Commission, 2019; UN, 2015). It is crucial to intervene in cities with a sustainable and climate-neutral perspective: cities are home to about half of the global population and, although they occupy only 3% of the earth's surface, they are responsible for 70% of energy consumption and 75% of CO₂ emissions, requiring socio-economic and productive infrastructure up to 300 times the physical size in terms of resource support areas (UN, 2015). As a result, the urban heat island, high population density, growing energy needs, and transportation emissions are amplified (Tucci, 2018; Losasso, 2022).

This research aims to investigate the potential and strategic role of in-between spaces in the transition of cities towards climate neutrality. Liminal and in-between spaces, often synonymous with absences, voids, and gaps between object forms (Piccinno and Lega, 2013), can be seen as ephemeral objects but also as an extraordinary field of work and experimentation for a possible 'green' future of cities (Rahmann and Jonas, 2011; Tucci, 2018): although often overlooked, they are the scene of changes in the lively management of daily life, playing a meso-climatic role and improving the connection between parts of cities and between the inhabitants themselves.

Through the technological-environmental design of these spaces, it is possible to contribute to the modulation of urban dynamics and the improvement of environmental quality, making places safer, usable and qualified, while also supporting efficient and circular use of resources (Tucci et alii, 2021; Marrone and Montella, 2022). For example, the Eco-boulevard in Madrid¹ introduces biocli-



Figg. 5, 6 | Stockholm Royal Seaport: Highlighting in QGis of the main elements that belong to the different analysis categories and which structure the urban redevelopment; Detail on 250 m pedestrian and 500 m bicycle module (credits: M. M. Pani).

matic structures arranged along the avenue that connects to Parque Nautilus, offering not only areas for rest and socialising, but also a device that actively and positively impacts the surrounding microclimate through energy production from renewables (Fig. 1). A further notable international case is in Seoul: Seocho 7017² centres on the redevelopment of a 1970s elevated driveway into a green pedestrian city link infrastructure (Fig. 2) and the connection between urban green areas.

The research aims to shift the semantic value of the term 'in-between' from waste spaces of

other systems (transportation, built environment, etc.) to a modular system that structures space and relationships for optimised and sustainable management of the resources that flow through them. In-between space is configured as a connective and unifying element in the regeneration of cities with a view towards sustainability and climate neutrality, «[...] in-between space is presented as an interface with a variable arrangement. It becomes a space with which to define and regulate various technological and environmental configurations of relationships, connections, activities,

N°	Location	Architects	Category	Typology of intervention	Year
1	Markthal (Rotterdam (The Netherlands))	MVRDV	Spaces adjacent to buildings	New construction	2014
2	Capitaspring (Singapore (Singapore))	BIG, Carlo Ratti Associati	Spaces adjacent to buildings	New construction	2022
3	Tainan Spring (Tainan (Taiwan))	MVRDV	Spaces between buildings	Redevelopment	2020
4	Karen Blixens Plads (Copenhagen (Denmark))	Cobe	Spaces between buildings	Redevelopment	2019
5	Stockholm Royal Seaport (Stockholm (Sweden))	Vv.Aa.	Network of in-between spaces	Redevelopment	2010-on-going
6	Nordhavn (Copenhagen (Denmark))	Vv.Aa.	Network of in-between spaces	New construction	2008-on-going

Tab. 1 | Table of examined case studies (credit: the Authors).

practices, behaviours, and solutions» (Angelucci, 2023, p. 32). The value resulting from implementing decarbonisation strategies, feasible through the integrated and multiscale technological-environmental design of such spaces, significantly affects the ecological performance of the entire urban system.

In this perspective, the experiences of eco-neighbourhoods around the world are significant, particularly those in the European area, whose pillars include decentralisation and the mixité of energy, physical and relational systems (Bögel et alii, 2021), according to a model of proximity, strengthened after the recent global lockdown experience and highlighting the importance of the relationships between built and open community spaces. Concepts such as the 15-minute city and models based on proximity and mixité (Moreno et alii, 2021) become the basis for a new level of modular organisation of urban districts.

According to the philosophy of 'chrono-urbanism' (Moreno, 2019) it is possible to identify a spatial module in the distance which can be covered on foot, by bicycle or via public transport, reverting measurements to human parameters related to time and space, which, among the first, had been investigated by Thomas Herzog and applied experimentally in the Solar City Linz-Pichling project implemented in the second half of the 1990s (Herzog and Steckeweh, 2000). Besides being the most natural mode of transportation (Gehl, 2017), walkability is the most widely accessible and universal form of physical activity, contributing to urban dwellers' overall health and well-being (Lee and Buchner, 2008). These spaces, prone to transformation over time, can improve the level of resilience of cities through a combination of adaptive architecture and integration with 'responsive' technologies, engaging in active dialogue with their surroundings (Andaloro, de Waal and Suurenbroek, 2022). Interpreting the in-between space is an indispensable step in assessing the liveability and sustainability of the contemporary city, thus ensuring an infrastructure of continuity and connections for places, people, goods and services (De Capua and Errante, 2019).

This research aims to offer a different take on the dimension of urban in-between spaces, often investigated in the literature for the reactivation of public space, communities or the possibilities of

mitigation of urban heat island effects. Indeed, there is little cross-disciplinary literature on the potential role such spaces can play in the decarbonisation of cities, which by contrast this research aims to investigate.

Building on the concept of in-between space as a component that controls and regulates a large part of the vital interactions of the urban ecosystem (Tucci, 2023), a concept firmly established since the 1980s in the field of Environmental Design, and in light of the multiple meanings attributable to in-between spaces, which now point to their high complexity³, the research aims, in particular: to structure a broad and articulate classification of such spaces; to identify and map a wide set of exemplary experiences in which these spaces have been structured, to enhance their role with a view to climate mitigation; to analyse their characters according to a set of specific criteria; and finally, to define a methodology for assessing their contribution to decarbonisation in the terms they can offer (which are, moreover, very broad, though so far too little investigated).

The contribution presents the results of research activities carried out in the context of the broader theme of the PRIN, 2017 Call, entitled Tech Start – Key Enabling Technologies and Smart Environment in the Age of Green Economy – Convergent Innovations in the Open Space / Building Systems for Climate Mitigation, on behalf of the Research Unit of the Department of Planning, Design, Technology of Architecture of the 'Sapienza' University of Rome.⁴

Methodology and operational phases of research

The systematic research activity was carried out in five temporally distinct phases. Based on a thorough review of the literature⁵, the first phase saw the definition of a classification method for the wide case history of in-between spaces found in urban settings, from building to district scale. These spaces are often overlooked and treated as non-places, voids, absences or result spaces, and intermediate elements between two extremes, therefore, difficult to frame and for too long 'imprisoned' in the logic of 'duality' or 'binary system' (Carmona, 2010), which focuses on the extremes and not on the conditions of transition – those that are included among those extremes – conditions that represent the most concrete locus

of possible change. Since it is not possible to refer solely to morphological aspects, as the caseload occurring at the international level is almost infinite, for the purpose of studying in-between spaces, the research proposes a comprehension model based on the four distinguishing dimensions: the design dimension, the sociocultural dimension, the economic-political dimension and the climatic dimension. The 'design' dimension highlights the function and degree of adaptability in time and space (Franck and Stevens, 2006). The 'sociocultural' dimension is directly related to the users' spatial perception and their possible interactions, which place them on a scale ranging from 'negative void' to 'everyday and familiar' (Dines and Cattell, 2006). The 'economic-political' dimension concerns the relationship between public and private space and the dynamics of inclusion (Malone, 2002) and exclusion (Flusty, 1997). Finally, in the 'climate' dimension, we find Marston Fitch's (1980) role of regulatory meso-environment and the aspects of bioclimatic functionality (Herzog and Steckeweh, 2000). However, while the latter dimension is often regarded as isolated, research interprets it as closely related to the other three dimensions, explicitly investigating their links and potential interactions (Fig. 3).

In the second stage, building on the correspondence to the characteristics that emerged in the analysis of the four dimensions of in-between spaces (design, sociocultural, economic-political and climatic), a hundred national and international case studies of urban in-between spaces were selected on a global scale, classified by macro-categories: spaces pertinent to buildings, communal and multifunctional, both indoor (such as spaces-buffers, bioclimatic atria, shared spaces, etc.) and outdoor (such as courtyards, patios, etc.); spaces between buildings, including interstitial spaces and public spaces such as squares or streets; and networks of spaces consisting of the connection of multiple public or semi-public spaces.

The examined case studies derive from interventions of new construction and urban regeneration. New interventions mainly refer to creating eco-neighbourhoods and eco-districts; in contrast, urban regeneration and redevelopment interventions consist of specifically focused actions, filling residual voids in the urban fabric and the built environment.

Subsequently, a case-response analysis was conducted in the third stage, with respect to six thematic axes defined before the collection and selection of cases; the cases were then evaluated using three specially developed criteria, as described below. This phase thus aimed to enucleate the modular basic units of the implemented interventions and understand how the design of these spaces, from a technological-environmental perspective, can characterise them as infrastructure supporting urban dynamics with a view to decarbonisation, efficient and circular use of resources and protection of natural ecosystems.

The first step of the analysis phase consisted of the verification of the case studies' adherence to the axes of the Green Cities⁶ (Tucci and Altamura, 2023): 'energy transition', 'bioclimatic responsiveness', 'functional mixité and proximity', 'resource circularity and self-sufficiency', 'sustainable mobility', and 'urban greening, green and grey CO₂ subtraction'. In particular, a qualitative evaluation method featuring a scale from 0 to 5 (with 5 as the maximum level) was adopted, returning the number and level of innovation of the solutions adopted in each intervention, in line with each axis, to reduce climate-altering emissions.

The second step was then geared toward assessing the impact of the technological-environmental design of in-between spaces on the urban system with respect, in particular, to the goal of climate neutrality. Specifically, the aim was to assess the potential role of in-between spaces as a structuring module in the redevelopment / regeneration of the urban fabric through the development of three analysis criteria, which are synergistically connected: Naturalness, Proximity and Circularity (Fig. 4).

In the research context, Naturalness refers to strategies related to water, greenery and soil. The presence of green areas in urban districts is crucial for controlling heat island effects, CO₂ absorption, stormwater runoff management and resilience to extreme weather events, as well as providing psycho-physiological benefits. In urban regeneration actions, integrated nature-based solutions enhance the mesoclimatic role of the in-between space, increase soil permeability, enable circular stormwater management, and promote biodiversity and spatial attractiveness (Scalisi and Ness, 2022).

Proximity, understood as a function of mixité, transport and liveliness of life, is one of the cornerstones of urban modulation. The three aspects are interdependent, as they fuel or dampen each other. Functional and social mixité is often defined as entropy, whereby the higher the value, the more it is possible to find diversified services and functions within it (Ewing and Cervero, 2001).

Providing public spaces with amenities reinforces soft mobility: it empowers the establishment of a sense of belonging and identity that leads people to transit and linger in those spaces, contributing to developing and reinforcing their vitality (Gehl, 2011). In addition, Proximity lends itself as a spatial module in the circular manage-

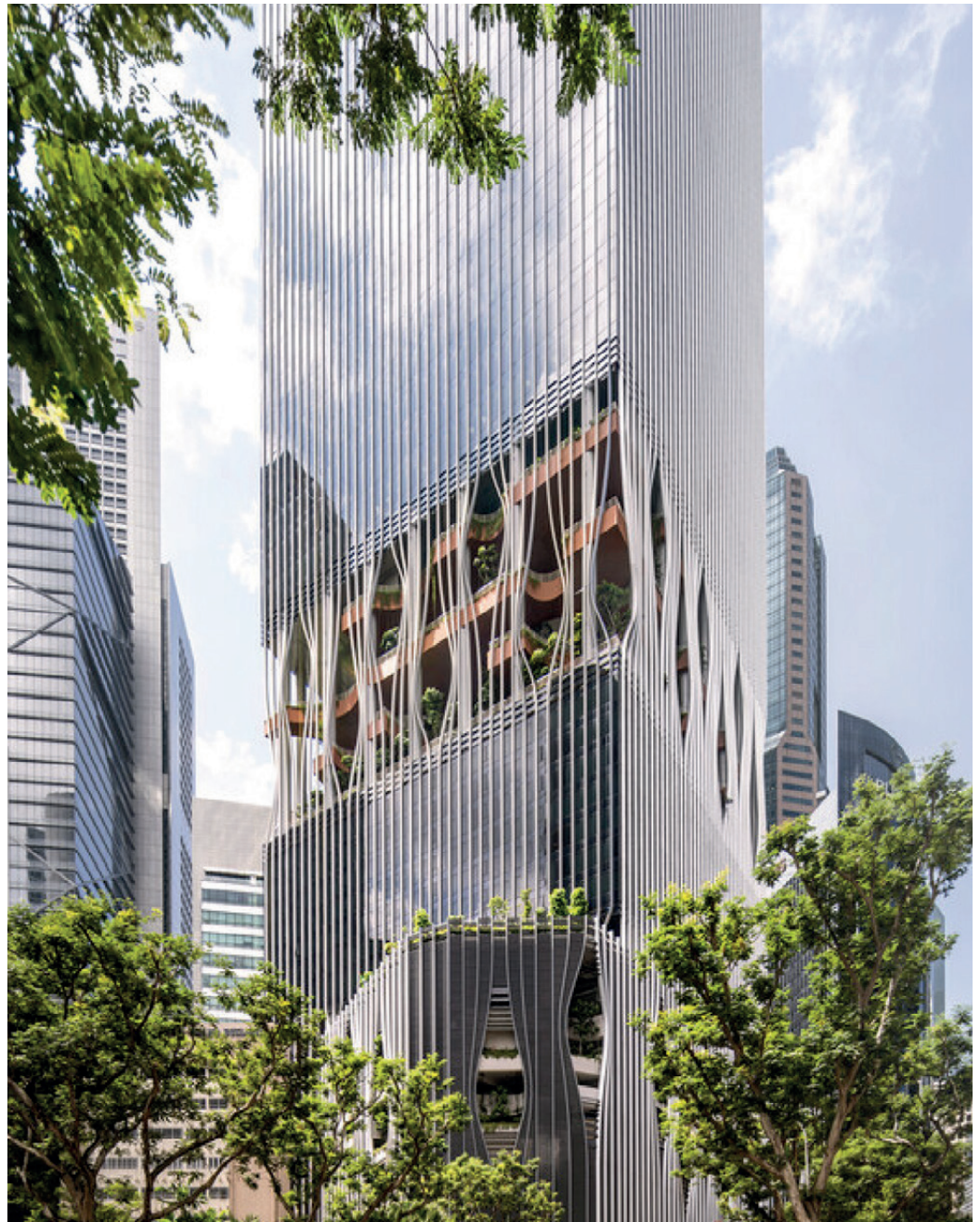


Fig. 7 | Markthal (2014) in Rotterdam, designed by MVRDV (credit: D. Scagliola and Brakkee).

Fig. 8 | Capitaspring (2022) in Singapore, designed by BIG and Carlo Ratti Associati (source: big.dk).

ment of the flows of material and intangible resources, responding to the problems of transit from globalisation to 'glocal' networks (Bauman, 2005; Andaloro, 2021): the implementation of circular strategies (reuse, repair, recycling) in the life cycle of products and materials is favoured by the presence of community places to promote good sharing and self-sufficiency practices, such as bicycle and electric car sharing services, increasing their accessibility and encouraging their use.

The fourth phase of the research involved the development of a method to analyse and graphically render the spatial and functional organisation of in-between spaces through georeferenced mapping in QGIS software (Figg. 5, 6). The graphical elaboration highlights the specific strategies

adopted according to the three criteria of Naturalness, Proximity and Circularity in the individual case studies, also pointing out the presence of key elements resulting from the implementation of specific strategies and identified during the analysis phase.

In mapping, in-between spaces are related to areas defined according to a module built on the spatio-temporal distance of pedestrian and bicycle trips, respectively, of 250 and 500 meters (Nalaskowska, 2021). The purpose of mapping is to visualise the system of in-between spaces, understood as infrastructure, and the networks that connect them, to highlight how they collaborate and integrate synergistically, in the support they offer to the different sociocultural, political-economic, planning, and climate dimensions.

Finally, the fifth phase of the research, currently nearing completion, is to define a methodology to measure the environmental benefits – in terms of reducing climate-changing emissions – achievable through the implementation of strategies attributable to Naturalness, Proximity and Circularity in in-between spaces by technical and technological actions. The methodology integrates different methods for estimating CO₂ emissions avoided and/or subtracted through individual project components (transportation / avoided travel, vegetation, on-site energy production, circular and local waste management, circular water resource management, etc.), structuring an overall picture that allows for a comparison of the pre- and post-intervention state and a quantitative assessment of the obtained benefits.

Research results | This section presents the research findings by illustrating six case studies that exemplify the observed dynamics, analysed through the previously described set of criteria (Tab. 1). The hereby reported case studies are representative of the aforementioned reference categories.

In the context of in-between spaces pertaining to buildings, internal functional and social mixité enables flow optimisation and circularity over short distances. With regard to the Markthal in Rotterdam, the axis of 'functional mixité and proximity' is expressed from the very conception of the design: the housing building is developed around an ample public space, physically surrounding it to the point of covering it and generating an in-between space which is both open and closed, with different functions depending on the time of day, market and supermarket during the day, and restaurants in the evening. By meeting the criteria of Proximity and Circularity, the building fosters local vitality through the mix and diverse transportation solutions in the vicinity, triggering dynamics of circularity of services, waste and products even with the nearby and historic open-air market (Fig. 7).

In the Capitaspring skyscraper, Singapore, which spans 51 floors characterised by the presence of green oases usable by both inhabitants and external users, greenery becomes a structuring element of interior distribution in response to the criterion of Naturalness and in accordance with the axis of 'green CO₂ subtraction and urban greening'. On the ground floor, the square serves as a connection and opening to the neighbourhood: following the block of housing and collective spaces is a large multi-story green oasis, which is then replicated on the roof. The greenery, in this case, in addition to contributing to cooling and purifying the air as well as providing a welcome respite within a highly cemented city, is also productive: the vegetable gardens supply the many restaurants in the skyscraper, following the axis of 'resource circularity and self-sufficiency' and triggering a dialogue between the criteria of Naturalness and Circularity (Fig. 8).

With reference to the spaces between buildings, precise interventions aimed at filling in residual urban voids or urban regeneration can trigger new



Fig. 9 | Tainan Spring (2020), designed by MVRDV (credit: D. Scagliola).

Fig. 10 | Karen Blixens Plads (2019) in Copenhagen, designed by Cobe (credit: R. Hjortshøj – COAST).

dynamics in the surroundings by fostering connections between different elements at the urban level, seeking to make urban voids positive and active places. In Taiwan, a disused shopping mall has become an urban square with water and greenery: Tainan Spring rises within the remnants of the pre-existing structure, transforming the abandoned building into a green oasis with water pools that are functional from both a social and bioclimatic point of view, contributing to the improvement of the surrounding microclimate in accordance with the axis of 'bioclimatic responsiveness'. Integrating an open place in a densely built environment has made it possible to improve circulation and the transportation system, fostering connections between previously non-communicating spaces, and using different strategies belonging to the criteria of Naturalness and Proximity (Fig. 9).

Regarding the redevelopment of Karen Blixens Plads, Copenhagen, the square gradually modulates the transition between the university area and a naturalistic area, accommodating several underground systems for parking bicycles and shaping the terrain in continuity with the natural development, directly affecting the axis of 'sustainable mobility' and integrating solutions of Naturalness and Proximity (Fig. 10).

With regard to the category of networks of spaces, the connection between different typologies (streets, squares, courtyards, rooftops, etc.) generates continuous systems of space utilisation, fostering the connection with the natural system and the preservation of biodiversity, optimising spatial-temporal paths in favour of sustainable mobility and healthy lifestyles, and offering opportunities for recovery, recycling and production on site. Such approaches are systemically found in eco-neighbourhoods and eco-districts born in the context of urban regeneration actions, where in-between spaces structuring as forms of organisation of urban space is also more evident.

In Stockholm, the Stockholm Royal Seaport eco-district, built on a former industrial area, has a strong connection with the nearby natural area, which is emphasised through careful design based on the space-time module that makes the district usable and connected within a 15-minute radius. Considerable attention is placed on the issue of greenery and ensuring accessible and usable green spaces from every home within a 300-meter radius (Fig. 11).

Lastly, the Nordhavn eco-district in Copenhagen: the intervention is spread over 11 islets, each of which is structured according to the 5-minute principle and, in turn, has its peculiar characteristics and activities that enable collaboration with the others, including through public transportation and cycling circuit. The spatial module is particularly evident here, collaborating with the temporal module, which invites the use of public spaces diversified by time of day, such as the square in front of an international school, or calls for a mix of uses, as in the case of the Park'n'Play multi-story parking lot, which features an area equipped for outdoor sports activities on its roof (Fig. 12).

Discussion of results and conclusions | Based on the comparative reading of the presented cases, selected following an extensive collection and analysis of national case studies that stand out for their innovative solutions and proposed models, the research produced a critical summary with a focus on solutions with promising impacts on climate mitigation and decarbonisation. In particular, the framework for assessing case adherence to the Green City Axes (Tab. 2) detects greater effectiveness in the case of networks of spaces, integrating all aspects more easily. In fact, 'energy transition' is absent in the other categories, while 'resource circularity and self-sufficiency' is variable. The other axes are largely developed in all cases.

Regarding the assessment framework through the criteria of Naturalness, Proximity and Circularity (Tab. 3), there appears to be a considerable concentration of actions related to Proximity in all categories, while Naturalness presents a lower recurrence in spaces pertaining to buildings, and Circularity is more implemented at the level of networks and buildings.

In conclusion, the research activity shows profiles of innovation in identifying the multiple impacts that urban space design, conscious of the perspective inherent in technological-environmental design, can offer with respect to the goal of climate neutrality in modulating the dynamics of urban evolution, transformation and regeneration. Moreover, in the most recent stage of research development, an additional innovative aspect was introduced by establishing a methodology for quantitative assessment of the impact of strategic actions undertaken in in-between spaces with a focus on climate neutrality. In this sense, with respect to this last activity, the difficulty of directly measuring the contribution of some of the decarbonisation strategies applicable in in-between spaces represents a research limitation (as in the case of solutions related to increasing functional mix). This implies the need to articulate the evaluation in several steps, breaking down the action into several directly assessable components.

Among the research perspectives, it is possible to identify the opportunity for a systematic def-



Fig. 11 | Stockholm Royal Seaport Ecodistrict (source: envacgroup.com).

Fig. 12 | Nordhavn Ecodistrict in Copenhagen (source: cobe.dk).

N°	Energy transition	Bioclimatic responsiveness	Functional mixité and proximity	Resource circularity and self-sufficiency	Sustainable mobility	Urban greening, green and grey CO ₂ subtraction
1 Markthal	○○○○○	●●●●○ Natural ventilation Natural lighting Bioclimatic envelope	●●●●○ Functional mix Social mix	○○●●○ Market	○○●●○ Parking Public transport	○○○○○
2 Capitaspring	○○○○○	●●●●○ Natural ventilation Natural lighting Bioclimatic envelope	●●●●○ Functional mix Social mix	●●●●○ Vegetable gardens for local food production and consumption	○○●●○ Bike parking Walk & cycle	●●●●○ Green oasis
3 Tainan Spring	○○○○○	●●●●○ Tree-line Water areas Shaded porch	●●●●○ Functional mix Social mix	○○●●○ Recycling of materials from previous structures	○○●●○ Public transport	○○●●○ Water ares Urban jungle
4 Karen Blixens Plads	○○○○○	○○●●○ Underground spaces Shading	●●●●○ Functional mix 5 minute city	○○○○○	○○●●○ Walk & cycle Bike parking	●●●●○ Biodiversity green connection
5 Stockholm Royal Seaport	○○●●○ Flexible smart grid Renewable energy Plus-Energy Buildings	●●●●○ Natural ventilation Natural lighting Bioclimatic envelope	●●●●○ Functional mix Social mix 5 minute city	●●●●○ Water and waste management Materials and circularity hub	○○●●○ Sustainable bus Walk & Cycle Electric car charging	●●●●○ Biochar CO ₂ storage Urban park & tree-line Raingarden & green roof
6 Nordhavn	○○●●○ Flexible smart grid Renewable energy	●●●●○ Natural ventilation Natural lighting Bioclimatic envelope	●●●●○ Functional mix Social mix 5 minute city	○○●●○ Water and waste management Materials hub	●●●●○ Green loop Walk & cycle Public transport	○○●●○ Seaweed CO ₂ storage Pocket park

N°	Naturalness			Proximity		Circularity			
	Water	Green	Soil	Transport	Mixité	Vibrant city	Waste	Service	Product
1 Markthal	○○○○○	○○○○○	○○●●○	○○●●○	●●●●○	○○●●○	○○●●○	○○●●○	○○●●○
2 Capitaspring	○○○○●	●●●●○	○○●●○	●●●●○	○○●●○	●●●●○	○○●●○	○○●●○	○○●●○
3 Tainan Spring	○○●●○	●●●●○	○○●●○	○○●●○	○○●●○	○○●●○	○○●●○	○○●●○	○○●●○
4 Karen Blixens Plads	○○○○○	○○●●○	○○●●○	○○●●○	○○●●○	○○●●○	○○○○○	○○●●○	○○○○○
5 Stockholm Royal Seaport	○○●●○	●●●●○	●●●●○	○○●●○	○○●●○	○○●●○	●●●●○	○○●●○	●●●●○
6 Nordhavn	○○●●○	●●●●○	●●●●○	●●●●○	●●●●○	●●●●○	●●●●○	○○●●○	●●●●○

Tab. 2 | Evaluation of the case studies examined based on the six thematic axes of Green Cities (credit: M. M. Pani).

Tab. 3 | Evaluation of case studies based on the criteria of Naturalness, Proximity and Circularity (credit: M. M. Pani).

initiation of guidelines, strategies, actions and technological solutions to support the technological-environmental design of in-between spaces in urban areas, aimed at organising these spaces into spatial modules that integrate and offer services (both ecosystemic and non-ecosystemic) and

equipment consistent with the key concepts of Naturalness, Proximity and Circularity. This product could support the activities of local governments in directing actions on urban in-between spaces in the direction of climate neutrality, adaptation and reduced resource withdrawal. With

regard to this perspective, there is a limitation in the infinite variability of the morphologies of urban in-between spaces, which can, however, be addressed precisely using the 'module' element in relation to the key concept of Proximity.

Notes

1) For more information, see the webpage: ecosistemaurbano.com/eco-boulevard/ [Accessed 11 October 2023].

2) For more information, see the webpage: mvr.dv.com/projects/208/seoullo-7017-skygarden [Accessed 11 October 2023].

3) «In-between spaces may from time to time, in the various senses of a unitary meaning, be understood as: 1. open spaces, empty spaces, spaces that are neither ‘enveloped’ nor bound; 2. spaces that structure the systemic diversification of the degree of naturalness; 3. ‘mesoclimatic’ spaces, which is to say spaces that are fundamental for the operations of climatic mediation by levels, between external macroclimatic factors and local microclimatic conditions; 4. spaces that structure the factors of the experiential component of the urban space, which is to say to express the topological component of the settlement system’s social, perceptive, and proxemic relationality; 5. positive spaces, antithetical to the negative vision of ‘non-places’, structuring the network of material and immaterial interactions taking place in the urban organism» (Tucci, 2023, pp. 14-16).

4) This paper is the product of research and experimentation activities carried out in continuity at ‘Sapienza’ University of Rome, Department of Planning, Design, Technology of Architecture, within the framework of the PNRR Rome Technopole Spoke 3 CUP: B83C22002820006 project, funded by PNRR Mission 4 – Component 2 – Investment 1.5 – RM TECH – Flagship Project No. 2 for which Prof. F. Tucci is the P.I., and in particular under Theme Line 1 ‘New project models of green-smart NZEB for energy transition, resource circularity and decarbonisation in constructions, towards Climate Neutrality and Positive Energy behavior, also aimed at the construction design of the new campus and headquarters of the Rome Technopole | Nuovi modelli progettuali di Net Zero Energy Building, green e smart, per la transizione energetica, la circolarità delle risorse, la decarbonizzazione e la lotta ai cambiamenti climatici, verso una Neutralità Climatica e un comportamento Positive Energy, anche mirati alla progettazione del nuovo campus e sede del Rome Technopole’, for which Prof. F. Tucci is also Co-Principal Investigator.

5) The following tools were used for the literature review: Researchgate.net, Google Scholar, and Discovery Sapienza. The search criteria included the following keywords: ‘in-between space’, ‘decarbonization’, ‘compact city’, ‘walkability’, ‘public space’, and ‘climate change’. In addition, monographs, conference proceedings, and articles in scientific journals published in the past twenty-five years globally were also considered.

6) The six axes of Green Cities guide systemic intervention in the urban built environment, supporting the achievement of climate neutrality targets while contributing to the decoupling between economic growth and resource consumption.

References

Andaloro, B., de Waal, M. and Suurenbroek, F. (2022), “Lo spazio pubblico adattivo – Esplorare la transizione digitale per il benessere sociale e ambientale | Adaptive public spaces – Exploring digital transition for social and environmental benefit”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 68-75. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1262022 [Accessed 11 October 2023].

Andaloro, B. (2021), “Il corpo fisico dell’architettura interattiva – Approcci scenario-based e generativo | The body of interactive architecture – Scenario-based and generative approaches”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 10, pp. 76-83. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1072021 [Accessed 11 October 2023].

Angelucci, F. (2023), *Il sistema spazio-ambientale urbano – La metaprogettazione tecnologica ambientale degli spazi intermedi urbani | The urban space-environmental system – The environmental technological metadesign of*

the urban in-between spaces, Altralinea Edizioni, Firenze.

Bauman, Z. (2005), *Globalizzazione e Glocalizzazione*, Armando Edizioni, Roma.

Bögel, P. M., Upham, P., Shahrokni, H. and Kordas, O. (2021), “What is needed for citizen-centered urban energy transitions – Insights on attitudes towards decentralized energy storage”, in *Energy Policy*, vol. 149, article 112032, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112032 [Accessed 11 October 2023].

Carmona, M. (2010), “Contemporary public space – Critique and Classification, Part One – Critique”, in *Journal of Urban Design*, vol. 15, issue 1, pp. 123-148. [Online] Available at: doi.org/10.1080/13574800903435651 [Accessed 11 October 2023].

De Capua, A. and Errante, L. (2019), “Interpretare lo spazio pubblico come medium dell’abitare urbano | Interpreting public space as a medium for urban liveability”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 6, pp. 148-161. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/6142019 [Accessed 11 October 2023].

Dines, N. and Cattell, V. (2006), *Public Spaces, Social Relations and Well-being in East London*, The Policy Press, Bristol. [Online] Available at: jrf.org.uk/report/public-spaces-and-social-relations-east-london [Accessed 11 October 2023].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN [Accessed 11 October 2023].

Ewing, R. and Cervero, R. (2001), “Travel and the Built Environment – A Synthesis”, in *Transportation Research Record | Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1780, issue 1, pp. 87-114. [Online] Available at: doi.org/10.3141/1780-10 [Accessed 11 October 2023].

Flusty, S. (1997), “Building paranoia”, in Ellin, N. (ed.), *Architecture of Fear*, Princeton Architectural Press, New York, pp. 47-59.

Franck, K. and Stevens, Q. (eds) (2006), *Loose Space – Diversity and Possibility in Urban Life*, Routledge, London.

Gehl, J. (2017), *Città per le persone*, Maggioli Editore, Roma.

Gehl, J. (2011), *Life between buildings – Using public space*, Island Press, Washington (DC).

Herzog, T. and Steckeweh, C. (2000), *StadtWende – Komplexität im Wandel | Trasformazione Urbana – Complessità e cambiamento*, Jovis Verlag, Berlin.

Lee, I.-M. and Buchner, D. M. (2008), “The Importance of Walking to Public Health”, in *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 40, issue 7, pp. S512-S518. [Online] Available at: doi.org/10.1249/MSS.0b013e31817c65d0 [Accessed 11 October 2023].

Losasso, M. (2022), “Crisi interconnesse e complessità del progetto | Interconnected crises and design complexity”, in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 23, pp. 7-9. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-12913 [Accessed 11 October 2023].

Malone, K. (2002), “Street life – Youth, culture and competing uses of public space”, in *Environment and Urbanization*, vol. 14, issue 2, pp. 157-168. [Online] Available at: doi.org/10.1177/095624780201400213 [Accessed 11 October 2023].

Marrone, P. and Montella, I. (2022), “Edifici e spazi di prossimità per la transizione energetica – Una sperimentazione su limiti e potenzialità delle Comunità Energetiche Rinnovabili nella città costruita”, in Ferrante, T. and Tucci, F. (eds), *BASES Benessere Ambiente Sostenibilità Energia Salute – Programmare e progettare nella transizione*, FrancoAngeli, Milano, pp. 347-355.

Marston Fitch, J. (1980), *La Progettazione Ambientale*, Franco Muzzio Editore, Roma.

Moreno, C. (2019), “The 15 minutes-city – For a new chrono-urbanism!”, in *moreno-web.net*, 29/12/2019. [Online] Available at: moreno-web.net/the-15-minutes-city-for

a-new-chrono-urbanism-pr-carlos-moreno/ [Accessed 11 October 2023].

Moreno, C., Allam, Z., Chabaud, D., Gall, C. and Pralong, F. (2021), “Introducing the ‘15-Minute City’ – Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities”, in *Smart Cities*, vol. 4, issue 1, pp. 93-111. [Online] Available at: doi.org/10.3390/smartcities4010006 [Accessed 11 October 2023].

Nalaskowska, S. (2021), “How to bring the city closer to people? Using spatial network analysis to create a 15-minute city”, in *Proceedings of European Transport Conference 2021*, pp. 1-16. [Online] Available at: researchgate.net/publication/354651826_How_to_bring_the_city_closer_to_people_Using_spatial_network_analysis_to_create_a_15-minute_city [Accessed 11 October 2023].

Piccinno, G. and Lega, E. (2013), “Spatial Design for New Typologies of Places – In-between Urban Spaces”, in Rogers, B. L. and Sugiyama, A. (eds), *Space and Place – Diversity in Reality, Imagination, and Representation*, Brill, Leida, pp. 41-49. [Online] Available at: doi.org/10.1163/9781848881266_005 [Accessed 11 October 2023].

Rahmann, H. and Jonas, M. (2011), *Urban Voids – The hidden dimension of temporary vacant spaces in rapidly growing cities – Proceedings of the State of Australian Cities National Conference in Melbourne*, Melbourne University Press, Melbourne, pp. 1-11. [Online] Available at: suelourbano.org/wp-content/uploads/2018/03/SOAC2011_02_29_final.pdf [Accessed 11 October 2023].

Scalisi, F. and Ness, D. (2022), “Simbiosi tra vegetazione e costruito – Un approccio olistico, sistemico e multilivello | Symbiosis of greenery with built form – A holistic, systems, multi-level approach”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 26-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1122_022 [Accessed 11 October 2023].

Tucci, F. (2023) “Lo spazio intermedio al centro della (meta)progettazione tecnologica ambientale”, in Angelucci, F. (ed.), *Il sistema spazio-ambientale urbano – La metaprogettazione tecnologica ambientale degli spazi intermedi urbani | The urban space-environmental system – The environmental technological metadesign of the urban in-between spaces*, Altralinea Edizioni, Firenze, pp. 14-23.

Tucci, F. (2018), *Costruire e Abitare Green – Approcci, strategie, azioni per una Progettazione Tecnologica Ambientale | Green Building and Dwelling – Approaches, Strategies, Experimentation for an Environmental Technological Design*, Altralinea Edizioni, Firenze.

Tucci, F. and Altamura, P. (2023), “Opportunità, indirizzi, strategie di mitigazione climatica attraverso la riduzione delle emissioni nelle città al 2030, verso la neutralità climatica al 2050”, in Tucci F., Cecafosso V., Altamura, P. and Turchetti, G. (eds), *Verso la neutralità climatica di architettura e città green – Approcci, indirizzi, strategie, azioni*, FrancoAngeli, Milano, pp. 76-113. [Online] Available at: doi.org/10.3280/OA-987 [Accessed 11 October 2023].

Tucci, F., Baiani, S., Altamura, P. and Cecafosso, V. (2021), “District Circular Transition e progetto tecnologico verso un modello di Circular City | District Circular Transition and technological design towards a Circular City model”, in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 22, pp. 227-239. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-10612 [Accessed 11 October 2023].

UN (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, A/RES/70/1. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2 [Accessed 11 October 2023].

UNFCCC (2021), *Glasgow Climate Pact*. [Online] Available at: unfccc.int/documents/310475 [Accessed 11 October 2023].

ARTICLE INFO

Received 08 September 2023
Revised 16 October 2023
Accepted 21 October 2023
Published 31 December 2023

CONFIGURAZIONI SPAZIALI NELL'ANALISI AMBIENTALE URBANA

Il contributo dell'isola di calore

SPATIAL CONFIGURATIONS IN URBAN ENVIRONMENTAL ANALYSIS

The role of the heat island effect

Adriano Magliocco, Gabriele Oneto

ABSTRACT

Il modulo, unità dimensionale di un sistema, è uno strumento ancora oggi utile per interrogare e pianificare le città. Il fenomeno dell'isola di calore è l'occasione di interrogarsi su come si possano costruire metodologie di lettura e analisi dei sistemi urbani che seguano principi ripetibili e univoci. Partendo dai dati ambientali di temperatura, spesso rappresentativi di porzioni di griglia quadrata delle città, vengono proposte alcune metodologie di analisi spaziale applicate su due città europee: Genova e Monaco. Attraverso le Local Climate Zones viene effettuata una prima mappa a scala urbana con un modulo quadrato. Le mappe successive interrogano il sistema infrastrutturale e morfologico in termini di grafo e tassellazione. Il pianificatore che lavora sui sistemi complessi può adattare questi strumenti alle proprie analisi, verificando e interrogando gli ambienti urbani.

The module, a system's unit of dimension, is a concept that is still useful in analysing and planning cities. The Heat Island Effect is the occasion for inquiring about how to develop methodologies for reading and understanding urban systems by following reproducible and univocal principles. Starting from environmental temperature data, often representative of portions of squared urban grids, some spatial analytical methodologies are proposed and applied to two European cities: Genoa and Munich. Using the Local Climate Zones, a first map is defined at the urban level using a squared module. Subsequent maps question the infrastructural and morphological systems using graphs and tessellations. The urban planner that operates on complex systems can place these tools beside their analyses, verifying and examining urban environments.

KEYWORDS

forma urbana, cambiamento climatico, morfologia urbana, sistemi complessi, analisi satellitare

urban form, climate change, urban morphology, complex systems, satellite analysis

Adriano Magliocco, Architect and PhD, is a Full Professor and vice-Director at the Department of Architecture and Design at the University of Genoa (Italy). His research topics revolve around environmental sustainability in architecture at different design scales. E-mail: adriano.magliocco@unige.it

Gabriele Oneto, Architect, is a PhD Candidate at the Department of Architecture and Design at the University of Genoa (Italy). His main research interests include computational design, nature-based solutions, environmental analysis in urban systems and adaptation to climate change, focusing on digital strategies for the urban heat island effect and urban floodings, and complexity urban theory. E-mail: gabriele.oneto@edu.unige.it



L'effetto isola di calore urbano è, secondo la Royal Meteorological Society (2017), un fenomeno che descrive le temperature elevate percepite nelle città rispetto ai dintorni rurali, particolarmente quelle avvertite di notte, poiché il calore trattenuto dalle superfici artificiali viene rilasciato lentamente, mantenendo le temperature più alte che in campagna; tale fenomeno è combinato con altri impatti come il ridotto effetto di raffreddamento della vegetazione nelle aree urbane e il calore antropogenico. L'apparente semplicità della definizione viene contraddetta dai numerosissimi studi che da decenni vengono svolti rilevando differenze nella definizione, nella misurazione e nella ampiezza dei valori di temperatura attribuibili alle isole di calore. Anche l'attribuzione dei termini 'urbano' e 'rurale' mostra alcune differenze, con conseguenze sulla validità e comparabilità dei risultati (Stewart, 2011).

In generale l'intensità dell'isola di calore varia con le dimensioni e le caratteristiche topografiche dell'insediamento ed è esacerbata dal cambiamento climatico (Manoli et alii, 2019; Sangiorgio, Fiorito and Santamouris, 2020). Sebbene molti studi scientifici si occupino del fenomeno in sé, concentrandosi sulle metodologie di rilevamento a prescindere dalle motivazioni, è bene ricordare che l'obiettivo principale di uno studio sull'effetto isola di calore dovrebbe essere quello di determinare quando e con quale estensione tale fenomeno determini condizioni di disagio termico per i cittadini in un'area urbana. Infatti, un effetto diretto sulla salute dell'uomo è il rischio legato ai colpi di calore, in particolare durante le ondate di caldo nella stagione estiva nella popolazione anziana, rischio che potrebbe aumentare in futuro a causa dell'aumento dell'urbanizzazione e dell'età media della popolazione (Heaviside, Macintyre and Vardoulakis, 2017; Tuholske et alii, 2021).

La descrizione dell'isola di calore e della vulnerabilità all'aumento localizzato delle temperature è possibile e facilitata da una griglia. Al fine di individuare le zone soggette a isola di calore in un'area urbana è necessario quindi mappare le differenze di temperatura tra aree rurali immediatamente adiacenti e aree centrali. In molti studi la Temperatura della Superficie Terrestre, o Land Surface Temperature (LST), è utilizzata come principale indicatore per mappare l'isola di calore, ottenuta prevalentemente in formato raster da sistemi di rilevamento satellitari. L'aspetto critico della analisi di queste informazioni, che provengono quindi da una griglia di pixel, consiste nel modo in cui sono integrate con i parametri morfologici (Equeer, Mirzaei and Riffat, 2020). Una mappatura del dato climatico non è prerogativa di strumenti satellitari: si può intervenire anche attraverso misurazioni dirette, come nel caso di Rotterdam.

Nel 2014 è stata fatta una estesa campagna di rilevamento delle temperature; le informazioni sono state inserite su una griglia con celle di 100 mq, utilizzando sia le temperature dell'aria rilevate direttamente sia le temperature superficiali da dati satellitari; si è passati, cioè, da una mappatura puntuale (le temperature rilevate direttamente) a una griglia regolare (van der Hoeven and Wandl, 2015). Le modalità di rilevamento, indirette e dirette, producono mappature diverse a seconda del grado di definizione e risoluzione, ma soprattutto a seconda della morfologia del modulo adottato, ovvero la dimensione corrispondente alla cella più piccola di una griglia che non necessariamente appare co-

me una struttura di celle ordinate. Nel caso della griglia quadrata l'approccio è naturale, perché rappresenta contemporaneamente il dato da analizzare, come nel caso dei pixel delle immagini satellitari, e il linguaggio con cui esprimere e rappresentare il fenomeno, cioè la mappatura (Gallo and Xian, 2014; Dong et alii, 2021).

Per quanto rapido e pragmatico il criterio sacrifica la rappresentazione della disomogeneità e complessità del sistema sottostante in virtù di una schematizzazione arbitraria, nata dalla risoluzione del dato che si deve modellare. Sebbene l'uso dei big data e delle mappe satellitari permetta di affrontare analisi di aree molto ampie, è molto complesso tenere in considerazione variabili morfologiche: la scelta del metodo di calcolo e di rappresentazione deve quindi tenere conto degli obiettivi per cui si compie l'analisi (Valmassoi and Keller, 2021). Interpretare fedelmente l'eterogeneità del sistema urbano nella pluralità delle scale rappresenta spesso la criticità e la limitazione di numerose rappresentazioni (Wang, 2022). Una prima soluzione può essere quella di considerare come suddivisione della forma urbana le perimetrazioni amministrative dei quartieri, a cui associare i dati delle temperature satellitari (Abrar et alii, 2022).

La ricerca di una corrispondenza più esplicita tra città e fenomeno di surriscaldamento porta a interrogarsi su nuove possibili suddivisioni della rappresentazione delle città, cioè su nuove configurazioni spaziali e moduli. Principi innovativi di aggregazione e di analisi dati riflettono la rilevanza della densità e della morfologia degli spazi urbani nella modellazione e nella rappresentazione (Arribas-Bel and Fleischmann, 2022). Lo studio e l'analisi della struttura e della morfologia urbana si è evoluto anche grazie all'individuazione di tipi, ovvero di connotati ripetibili che possono identificare un particolare territorio (Muratori, 1960; Caniggia and Maffei, 1982); oggi, la definizione di nuovi tipi e di nuove forme ripetibili per misurare e descrivere le città può essere svolta facendo leva sulla modellazione digitale.

In questo articolo verranno analizzate le principali differenze e potenzialità di alcune teorie contemporanee applicate ai fenomeni di surriscaldamento dello spazio urbano; ciascun approccio rappresenta un diverso principio con cui gli elementi della città interagiscono, generando principi formali e quindi moduli. Attraverso i metodi dell'analisi spaziale, della analisi dei grafi e della morfogenesi, gli stessi casi studio produrranno mappe sensibilmente diverse: la forma del surriscaldamento della città non è quindi solo una griglia di quadretti di colore oscillante su uno spettro tra il rosso e il verde; le forme possibili sono anche reti di assi e nodi, tasselli poligonali: suddivisioni ripetibili, modulari e riconoscibili dal contesto costruito, sociale economico ed ecologico al di sotto dell'analisi ambientale. Il ruolo dell'Architetto e del Pianificatore consiste quindi nello sviluppare criticamente l'analisi dell'ambiente urbano e trarre opportune letture e relazioni delle criticità rilevate.

L'articolo tratta i casi di due città europee, Genova e Monaco di Baviera, due contesti geografici differenti: l'una bagnata dal Mare Mediterraneo e l'altra alle spalle della catena Alpina, la prima gode di una temperatura mite, mentre la seconda segue il regime continentale. Ciononostante entrambe le città possiedono un tessuto complesso, intrecciato da un passato industriale e un presente

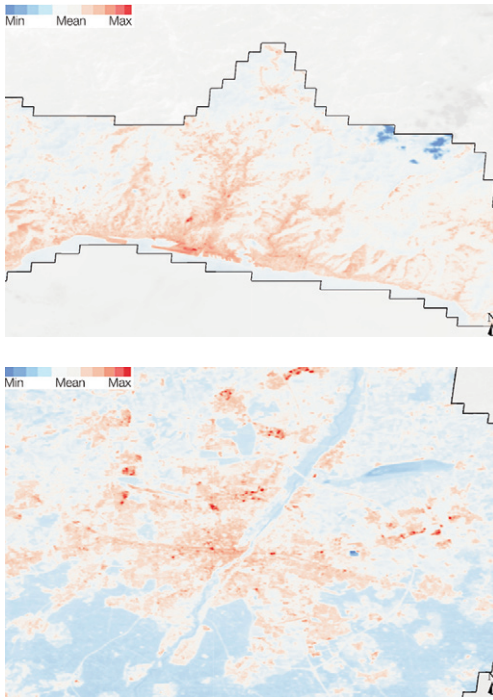
eterogeneo con aree dismesse e tentativi di riqualificazione urbana. In questa generale complessità, metodi d'indagine innovativi e su misura possono comportare risultati altrimenti difficilmente apprezzabili; per entrambe le città è stato scelto un caso studio emblematico del problema.

Materiali e metodologia | La scelta dei casi studio si è basata su due criteri: il primo legato alla manifestazione di una pronunciata differenza di temperatura rispetto al tessuto urbano limitrofo; il secondo identificato dall'eterogeneità della forma e delle funzioni del quartiere. Affrontare aree ad alta complessità potrebbe infatti permettere di ottenere forme di sintesi più efficaci, altrimenti non facilmente deducibili. I poli così definiti sono stati circoscritti secondo un criterio che possa tenere conto della reale vivibilità dell'area, ovvero la percorribilità a piedi. È stato scelto un tempo di quindici minuti, rappresentativo dell'abitare quotidiano nel quartiere, oltre a ulteriori cinque minuti per osservare l'effetto al bordo del tessuto urbano. Per definire la distanza lineare, nel rispetto della letteratura scientifica (Gralls-Garrido et alii, 2021) è stato selezionato un passo percorribile di 4,5 km/h, utilizzato quindi nella componente computazionale.

L'analisi termica urbana verte sull'analisi dello storico tra gli anni 2015 e 2022 di mappe fornite dal satellite Landsat-8, disponibili sulle piattaforme dell'Agenzia Spaziale Europea¹ e di Copernicus²; in assenza di rumore (le nuvole) le mappe forniscono informazioni a scala di 30 metri su diverse letture spettrali. Attraverso il metodo dello Split Window con opportune correzioni (Rozenstein et alii, 2014) è possibile definire l'intensità del fenomeno isola di calore dallo scarto tra la temperatura superficiale della cella nel perimetro urbano e nell'ambiente rurale limitrofo.

L'operazione è stata eseguita per le Città di Genova e Monaco di Germania (Figg. 1, 2), utilizzando come perimetrazione le Aree Urbane Funzionali, un criterio di individuazione delle porzioni di territorio urbano secondo indici di densità abitativa e sviluppo economico definito dalla Comunità Europea (Joint Research Centre of the European Commission et alii, 2019). La verifica della traccia termodinamica urbana basata sulla temperatura superficiale è stata ottenuta incrociando la lettura con i dati della temperatura dell'aria forniti da Copernicus nel periodo 2008-2017 (Hooyberghs et alii, 2019): questa lettura ha permesso di validare la corretta implementazione delle mappe satellitari (Figg. 3, 4).

La rimessa del trasporto pubblico in Via Paolo Reti si inserisce in un contesto densamente abitato: il quartiere di Sampierdarena; proveniente da un recente passato industriale e in corso di ristrutturazione urbana, questo quartiere residenziale di periferia è attraversato da arterie principali di mobilità autoveicolare e ferroviaria (Fig. 5). Condizioni simili di eterogeneità urbana si trovano nel polo identificato dal Strassenbahndepot (deposito dei tram) di Monaco, situato in Einstein Strasse: di nuovo l'infrastruttura pesante e il deposito del trasporto pubblico sono collocati in vicinanza a quartieri densamente abitati, in questo caso caratterizzati da case a corte (Fig. 6). In entrambi i casi, le maglie e griglie urbane sono mescolate e frammentate dalla grande rete viaria, generando microcosmi di complessità che possono essere analizzati con strumenti diversi.



Figg. 1, 2 | Mean distribution of Land Surface Temperature (LST) during 2015-2022, Functional Urban Areas of Genoa and Munich, scale 1:100,000 (credits: G. Oneto, 2023).

Le Local Climate Zones (LCZ), o zone climatiche locali, forniscono un quadro di ricerca per gli studi sulle isole di calore urbane proponendo uno standard mondiale di classificazione del territorio (Stewart and Oke 2012). Il sistema LCZ si basa sul concetto di struttura urbana, definito dai caratteri fisici della superficie della città e dalle attività che si svolgono. Il sistema adotta 17 categorie, variando dai centri urbani altamente densi alle aree rurali; in particolare il sistema è stato frequentemente adottato per identificare le aree ad alto stress termico e sviluppare strategie per mitigare i diversi impatti indotti dai surriscaldamenti urbani (Aslam and Rana, 2022).

Definire oggi le LCZ in un contesto urbano è possibile attraverso l'applicativo LCZ-Generator (Demuzere, Kittner and Bechtel, 2021): attraverso delle linee guida, un algoritmo di riconoscimento delle immagini satellitari riceve le istruzioni di un tecnico, permettendo di rappresentare la copertura LCZ di una data area geografica. L'operazione non è completamente automatica, perché richiede la conoscenza del sistema di classificazione e una prima mappatura analogica per istruire il riconoscimento.

Le LCZ sono significative a una scala urbana, pertanto la forma originata su Genova può aiutare a comprendere il contesto in cui l'area in esame si colloca, ma declina ad altre rappresentazioni uno studio più approfondito. L'area di Sampierdarena si mostra quindi prevalentemente come tessuto denso, basso e compatto (classe 3), limitrofo alla zona industriale portuale (classe 10). Ciononostante la connotazione lineare della città costiera mette in crisi questa rappresentazione a maglia quadrata; per esempio, l'ampia fascia industriale che connota tutto il litorale maschera in realtà un tessuto residenziale storicizzato, coinvolgendo con lo stesso colore l'antica Darsena e il Molo (Fig. 7).

Monaco invece permette di dilatare la classificazione decomprimendo lo spazio della città; di

conseguenza la frammentazione quadrata si articola su un tessuto comunque compatto, ma formato da edifici di media altezza (classe 2). L'area in esame coinvolge anche aree aperte (classe 4), composte da isolati più larghi e con ampie corti e l'analisi aiuta nella definizione del confine tra centro urbano e periferia, rimarcando differenze spaziali indotte dall'attività antropica (Fig. 8).

La seconda mappa insiste sulla complessità del sistema infrastrutturale, affiancato a quello della mobilità lenta che caratterizza la vita quotidiana dei quartieri residenziali; attraverso l'effetto canyon, ovvero quel rapporto di larghezza del manto stradale e altezza degli edifici che connota una forma a corridoio, le strade sono spesso causa di disagio termico locale per le persone. Fare leva sulla teoria dei grafi per analizzare la rete stradale in relazione ai fenomeni di surriscaldamento permette di evidenziare i rapporti tra i diversi elementi in termini di relazioni matematiche (Mohamed et alii, 2021).

Un grafo, ovvero un sistema caratterizzato da oggetti, nodi e relazioni in forma di segmenti orientabili, può dare segno della propria robustezza e resilienza attraverso l'analisi della sua centralità; essa rappresenta l'importanza di un nodo nella rete, e in particolare la centralità dei nodi valuta il numero di percorsi più brevi che passano attraverso ogni nodo o segmento (Barthélemy, 2004). La centralità massima in una rete è un indice di resilienza del sistema, ovvero la sua capacità di trovare percorsi alternativi se uno di questi dovesse essere scartato; in pratica questo significa che di fronte a una scelta di una strada da percorrere, un sistema maggiormente resiliente permette al pedone di scegliere la strada meno calda. La libreria Python OSMNX (Boeing, 2017) consente di operare sui sistemi di tutte le città del mondo e calcolare queste dimensioni; la mappa rappresenta quindi con un gradiente le strade che ricadono in territori più esposti al calore urbano, e in ogni nodo è indicata la resilienza locale attraverso il calcolo delle centralità.

Il caso genovese mostra la differenza tra l'antico quartiere residenziale periferico e le nuove strade di percorrenza rapida; questo rapporto si mantiene costante grazie alla presenza di una maglia che segue l'andamento del terreno e del fiume Polcevera. La traccia termica rappresenta un problema secondario per la mobilità lenta: le strade piccole, residenziali, sono mediamente meno esposte a temperature elevate e sono connesse da nodi con alta centralità (Fig. 9).

L'espansione urbana è invece il contesto in cui si legge la rete stradale del caso di Monaco: grandi arterie longitudinali costeggiano il sistema su rotaia che taglia l'area analizzata, sulle quali si innestano i quartieri residenziali. Mediamente si nota come allontanandosi radialmente dal deposito dei tram le strade assumono una dimensione di maggiore comfort. La rappresentazione della centralità permette di individuare facilmente i percorsi preferenziali, in cui il contesto e il particolare orientamento degli assi stradali assumono un ruolo fondamentale (Fig. 10).

La terza mappatura si basa sulla tassellazione del tessuto urbano rispetto al principio formale, ovvero i connotati delle strade e edifici che rappresentano il costruito, e al grado di differenza termica dovuto dalla temperatura superficiale. La tassellazione chiusa è stata sviluppata in contesto inglese per analizzare ambienti complessi, formando dei

moduli spaziali poligonali ottenuti da dati della morfologia e delle caratteristiche funzionali del territorio (Fleischmann and Arribas-Bel, 2022). In questa logica, l'algoritmo generativo del criterio pesa e mette a sistema i dati eterogenei, suggerendo una suddivisione della città seguendo barriere umane come strade, fiumi e ferrovie, ma anche connotati del territorio come la boscosità o il traffico. I tasselli vengono quindi raggruppati formando le tracce spaziali, un numero di raggruppamenti specifico per il caso in esame, rappresentativi di categorie omogenee dello spazio urbano.

Nei casi di Genova e Monaco sono state calcolate le tassellazioni chiuse derivando i dati urbani da banche date pubbliche come Open Street Maps³ e Copernicus⁴; invece di ibridare le qualità formali con quelle funzionali, come la presenza di ristoranti sul territorio, sono state invece realizzate le tracce spaziali con le temperature superficiali. Su entrambe le mappe è stato esteso lo studio su un diametro doppio rispetto a quello dell'area di analisi, al fine di ottenere risultati maggiormente rappresentativi del contesto.

Il caso genovese ha prodotto dodici raggruppamenti omogenei per forma e risposta all'esposizione termica: è subito significativo il fatto che l'autorimessa, ipotizzata inizialmente come sede locale di un particolare disagio termico, ricade insieme al tessuto storico del quartiere (cluster I). Le porzioni che invece incidono maggiormente sul surriscaldamento sono imputabili all'ex tessuto industriale siderurgico, oggi riconvertito in grande magazzino (cluster B); questo esempio pone l'attenzione sull'effettivo rischio di trarre conclusioni affrettate riguardo il tipo edilizio, senza tenere in considerazione il contesto in cui si colloca (Fig. 11).

Il caso di Monaco ha prodotto un numero inferiore di raggruppamenti rispetto a Genova, ovvero nove; la maggiore regolarità può derivare dalla minore densità del tessuto cittadino, permettendo isolati più larghi, parchi e spazi di ampio respiro. La rappresentazione omologa la rete infrastrutturale con i depositi e le aree aperte cementificate (cluster O, N); di contro si pone l'attenzione sulla frammentarietà del tessuto alle spalle (cluster M, P, Q, R), composto da diverse realtà edilizie che, per materiali, forma e utilizzo del verde, hanno una risposta molto diversa all'esposizione al calore (Fig. 12).

Le tre diverse tecniche di rappresentazione sono composte ciascuna da diverse regole: questi principi raccolgono la complessità del tessuto urbano, lo analizzano e sintetizzano e producono tre diverse logiche in forma di geometrie e attributi (Tab. 1). La corrispondenza dei risultati è stata ottenuta dal confronto con le precedenti mappe di temperatura aerea (Hooyberghs et alii, 2019). La ripetizione di contesti omogenei ha come risultato un'immagine per forza analoga, che permette quindi di mettere in paragone città diverse, provenienti da zone della Terra diverse: un modulo è dimensione e misura della ripetizione, e come tale è regolato appunto da regole e principi. Riconoscere e aprire queste logiche, a volte lasciate acriticamente in mano a tecnici, permette invece ad Architetti e Pianificatori di toccare con mano la complessità delle città, mentre le zone climatiche locali possono avere rilevanza nel dettare le regole a vasta scala, altri strumenti sono richiesti quando si lavora a livello di quartiere.

I grafi sono molto utilizzati nelle analisi urbane, ogni volta in cui l'elemento strada e le sue carat-

teristiche diventano particolarmente rilevanti ai fini dell'analisi. L'utilizzo di strumenti informatici per l'analisi della rete infrastrutturale permette di mettere maggiormente in evidenza le relazioni e rapporti, altrimenti difficilmente apprezzabili. Le tassellazioni, invece, sono una grande famiglia di suddivisioni dello spazio di cui anche la griglia quadrata fa parte. Il criterio spartiacque è l'arbitrarietà della definizione della poligonale che definisce un tassello: le tassellazioni chiuse riescono a ibridare l'effettiva forma del territorio con dati eterogenei, che arricchiscono e colorano il mosaico di tracce spaziali che si genera.

Conclusioni | Il modulo per l'Architetto e il Pianificatore è un criterio dimensionale di classificazione del sistema urbano, riconoscibile, riproducibile e costituito da principi e relazioni. L'analisi affrontata nei due casi di Genova e Monaco pone l'attenzione sull'esistenza di strumenti che un professionista può adottare per spingere l'analisi e la verifica delle sue ipotesi sui tessuti urbani. Il supporto alle Amministrazioni locali spesso si muove attraverso ingenti spese e simulazioni, a volte sovradimensionate rispetto ai reali obiettivi.

La capacità di trarre in maniera diretta dei risultati da dati disponibili apertamente e validati dalla comunità scientifica permette da un lato di migliorare la competitività, dall'altro di dimostrare trasparenza e oggettività di analisi; infatti, i dati adoperati nell'articolo provengono interamente da banche dati validate dall'Unione Europea. L'oggettività delle rappresentazioni è invece data dal rigore con cui queste regole vengono fissate e seguite; questo deve permettere e accettare, a volte, piccole aberrazioni grafiche, prodotte da sovrapposizioni, effetti al bordo o errori negli stessi dati. L'apporto di uno studioso del costruito è in questo caso di nuovo strumentale, perché è capace di fornire una risposta multiscalare e multidisciplinare al problema.

Le principali limitazioni dello studio sono di natura computazionale, quindi per limitare la complessità e i tempi di calcolo, sono state selezionate

delle regioni limitate di spazio: è immaginabile che l'estensione dell'area di studio potrebbe generare delle classi omogenee diverse, portando a una narrazione visiva differente. Maggiore rilevanza inoltre potrebbe essere data al contesto funzionale del territorio, come l'uso del territorio e le attività antropiche all'interno. Questi aspetti potrebbero arricchire le classificazioni, dimostrando delle relazioni che da queste mappe non è possibile evincere.

Se le zone climatiche locali sono uno strumento tipico dello studio delle isole di calore, grafi e tracce spaziali possono essere sfruttate interrogando le città su problematiche differenti; per esempio il fenomeno delle inondazioni improvvise dovute all'incremento delle piovosità può essere analizzato con logiche analoghe. Inoltre l'applicazione di tematiche ambientali ed ecologiche, come la connettività degli habitat, può diventare nuova regola generativa dei moduli di analisi urbana, andando così incontro a logiche di sostenibilità che reclamano le nostre città veri e propri ambienti urbani. Nel prevedere un proseguo della ricerca utilizzando grafi e tassellazioni per indagare gli ambienti urbani si perseguiranno due condizioni: la prima riguarda la qualità dei dati, ovvero una selezione maggiormente descrittiva dell'eterogeneità urbana specialmente di carattere socioeconomico; la seconda riguarda la modellazione, ovvero l'estensione dei metodi precedenti a casi studio più ampi e di conseguenza più complessi; in questa seconda fase sarà eseguito il processo di validazione e verifica dell'applicazione delle diverse metodologie.

impacts such as the reduced cooling effect of vegetation in urban areas and anthropogenic heat. The apparent simplicity of this definition is contradicted by numerous studies that have been carried out for decades, detecting differences in interpretation, measurement, and amplitude of temperature values attributable to heat islands. The assignment of the terms 'urban' and 'rural' also shows some disparities, with consequences on the validity and comparability of the results (Steward, 2011).

Generally speaking, the intensity of the heat island varies depending on the size and topographical characteristics of the settlement and is exacerbated by climate change (Manoli et alii, 2019; Sangiorgio, Fiorito and Santamouris, 2020). Although many scientific studies deal with the phenomenon itself by focusing on detention methodologies regardless of the motivations, it is good to remember that the main objective of a study on heat islands should be to determine the conditions of thermal discomfort for citizens in a set urban area. In fact, one direct effect on human health is the risk of heat strokes, particularly in the elderly population during heat waves in the summer season, a risk which could increase in the future due to the increment of urbanisation and the average age of the population (Heaviside, Macintyre and Vardoulakis, 2017; Tuholske et alii, 2021).

The description of heat islands and the vulnerability to localised increases in temperature is possible and facilitated by a grid. In order to identify the areas subject to heat islands in cities, it is, therefore, necessary to map the temperature differences between immediately adjacent rural areas and central areas. In many studies, the Land Surface Temperature (LST) is the leading indicator to map the heat island, obtained mainly in raster format from satellite remote detection systems. The critical aspect of analysing this information, which consequently comes from a grid of pixels, lies in how it is integrated with the morphological parameters (Equere, Mirzaei and Riffat, 2020). Mapping climate data is different from the prerog-

The Urban Heat Island Effect is, according to the Royal Meteorological Society (2017), a phenomenon that describes the peak of temperature perceived in cities as compared to rural areas, especially at nighttime, because the heat retained by artificial surfaces is released slowly, therefore keeping temperatures higher than in the countryside. This phenomenon is combined with other

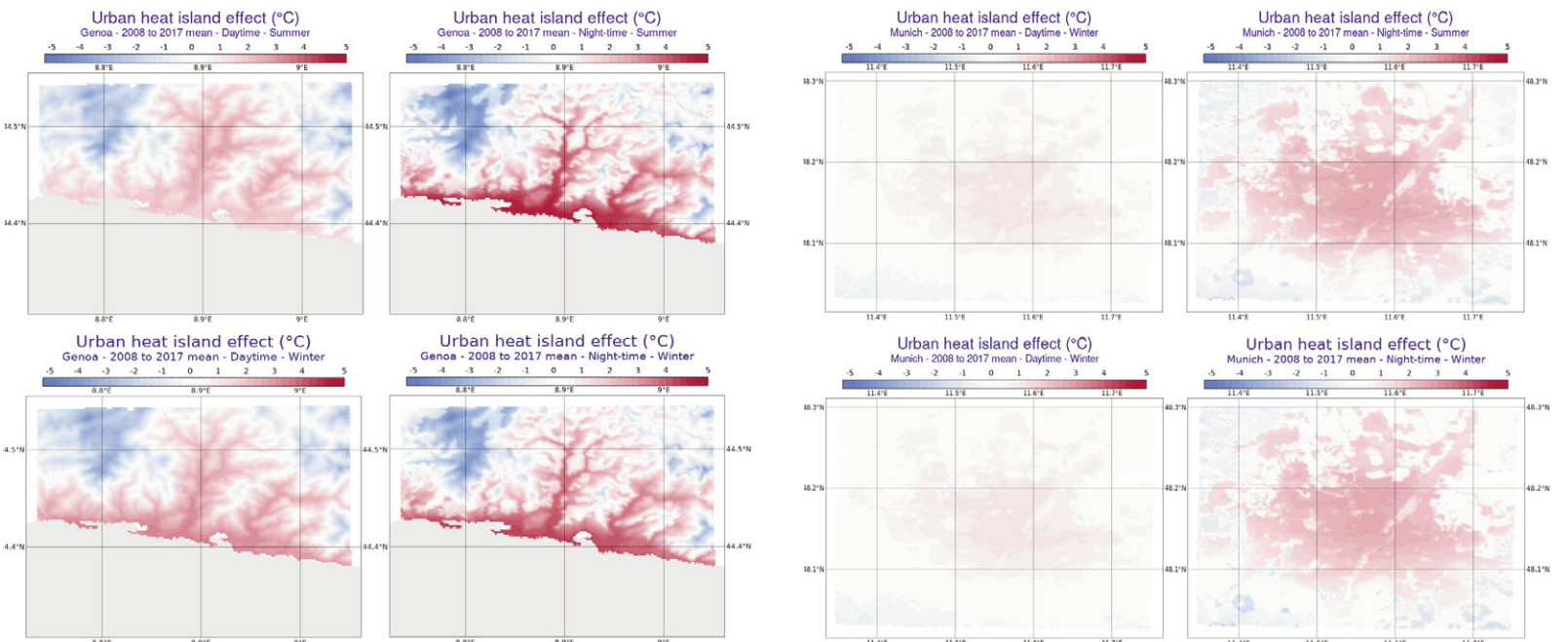


Fig. 3, 4 | Urban Heat Island Effect during 2008-2017, Genoa and Munich (source: Hooyberghs et alii, 2019).



Fig. 5 | Genoa case study: 20-minute walking boundary from the local hotspot (credit: G. Oneto, 2023).

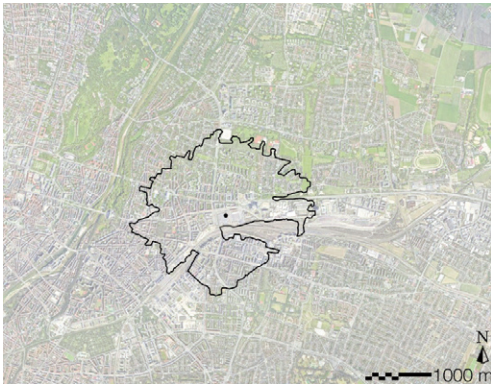


Fig. 6 | Munich case study: 20-minute walking boundary from the local hotspot (credit: G. Oneto, 2023).

ative of satellite instruments: it can also be done through direct measurements, as in the case of Rotterdam.

In 2014, an extensive temperature measurement campaign was carried out. The information was entered on a grid formed by 100 sqm cells, using both air temperatures measured directly and surface temperatures from satellite data; thus, we have moved from punctual mapping (temperatures measured directly) to a regular grid (van der Hoeven and Wandl, 2015). The indirect and direct detection methods produce different mappings depending on the degree of definition and resolution, but above all relatively to the morphology of the adopted module, i.e. the dimension corresponding to the smallest cell on a grid which does not necessarily appear as a structure of sorted cells. In the case of the square grid, the approach is natural because it simultaneously represents the data to be analysed, as in the case of the pixels of satellite images, and the interpretation with which the phenomenon is expressed and represented, i.e. mapping (Gallo and Xian, 2014; Dong et alii, 2021).

Insofar as rapid and pragmatic, the criterion sacrifices the representation of the underlying system's non-homogeneity and complexity by an arbitrary schematisation generated from the data resolution that must be modelled. Although the use of big data and satellite maps allows analyses of very large areas to be conducted, considering morphological variables is very complex: the choice of the calculation and representation method must, therefore, take into account the objectives for which the analysis is carried out (Valmassoi and Keller, 2021). Faithfully interpreting the heterogeneity of the urban system, in the plurality of scales, often exemplifies

the criticality and limitation of numerous representations (Wang, 2022). A first solution could be to consider the administrative perimeters of the neighbourhoods as a subdivision of the urban form, to which satellite temperature data can be associated (Abrar et alii, 2022).

The search for a more explicit correspondence between the city and the overheating phenomenon leads to questions about new subdivisions of the representation of cities, that is, about new spatial configurations and modules. Innovative data aggregation and analysis principles reflect the relevance of urban spaces' density and morphology in modelling and representation (Arribas-Bel and Fleischmann, 2022). The study and analysis of urban structure and morphology have also evolved thanks to identifying type or repeatable characteristics that can identify a particular territory (Muratori, 1960; Caniggia and Mafferi, 1982). Today, the definition of new types and new repeatable forms to measure and describe cities can be carried out by leveraging digital modelling.

In this article, the main differences and potential of some contemporary theories applied to the overheating of urban space will be analysed; each approach represents a different principle with which the elements of the city interact, generating formal principles and modules. The same case studies will produce significantly different maps through the methods of spatial analysis, graph analysis and morphogenesis. The shape of a city's overheating is, therefore, not just a grid of coloured squares oscillating on a spectrum between red and green; the possible forms are also networks of axes and nodes, polygonal tiles: repeatable, modular, and recognisable patterns of the built, social, economic, and ecological context beneath the environmental analysis. Therefore, the architect and the urban planner's role is critically developing the analysis of the urban environment and drawing appropriate readings and reports of the critical issues detected.

This article deals with the cases of two European cities, Genoa and Munich, which come from two different geographical contexts: one lapped by the Mediterranean Sea and the other behind the Alpine chain, the former enjoying a mild temperature while the latter follows the continental regime. Nonetheless, both cities have a complex fabric intertwined with an industrial past and a heterogeneous present with brownfield areas and attempts at urban redevelopment. In this general complexity, innovative and tailor-made investigation methods can bring results that would otherwise be difficult to appreciate. For both cities, a case study emblematic of the problem was chosen.

Materials and methodology | The choice of case studies was based on two criteria: the first linked to the manifestation of a pronounced difference in temperature compared to the surrounding urban fabric; the second identified by the heterogeneity of the form and functions of the district. Addressing areas of high complexity would allow us to obtain more effective forms of synthesis, which would otherwise not be easily deducible. The hubs thus defined have been circumscribed according to a criterion that can consider the real liveability of the area, i.e. accessibility on foot. A time of fifteen minutes was chosen, representative of daily living in the neighbourhood, as well as

an additional five minutes to observe the effect at the edge of the urban fabric. To define the linear distance, in compliance with the scientific literature (Graells-Garrido et alii, 2021), a walkable pace of 4.5 km/h was selected and used in the computational component.

The urban thermal analysis focuses on the analysis of the history of maps provided by the Landsat-8 satellite between the years 2015 and 2022, available on the European Space Agency¹ and Copernicus² platforms; in the absence of noise (clouds), the maps provide information at a 30-metre scale on different spectral readings. Using the Split Window method with appropriate corrections (Rozenstein et alii, 2014), it is possible to define the intensity of the heat island phenomenon from the difference between the surface temperature of the cell in the urban perimeter and the surrounding rural environment.

The operation was carried out for the cities of Genoa in Italy and Munich in Germany (Fig. 1, 2), using the Functional Urban Areas as a perimeter, a criterion for identifying portions of urban territory according to indices of population density and economic development defined by the European Community (Joint Research Centre of the European Commission et alii, 2019). Verification of the urban thermodynamic trace based on the surface temperature was obtained by crossing the reading with the air temperature data provided by Copernicus in the period 2008-2017 (Hooyberghs et alii, 2019): this reading allowed us to validate the correct implementation of the satellite maps (Fig. 3, 4).

The public transport garage in Via Paolo Reti is part of a densely populated context: the Sampierdarena district. Coming from a recent industrial past and in the process of urban restructuring, this suburban residential neighbourhood is crossed by main vehicular and railway arteries (Fig. 5). Similar conditions of urban heterogeneity are found in the hub identified by the Strassenbahndepot (tram depot) of Munich, located in Einstein Strasse: again the heavy infrastructure and the public transport depot are located close to densely inhabited neighbourhoods, in this case characterised by courtyard houses (Fig. 6). In both cases, the urban networks and grids are mixed and fragmented by the extensive road network, generating microcosms of complexity that can be analysed using different tools.

Local Climate Zones (LCZs) provide a research framework for studies on urban heat islands by proposing a global land classification standard (Stewart and Oke, 2012). The LCZ system is based on the concept of urban structure, defined by the physical characteristics of the city surface and the activities that take place. The system employs 17 categories, ranging from highly dense urban centres to rural areas; in particular, the system has been frequently adopted to identify areas of high thermal stress and develop strategies to mitigate the different impacts induced by urban overheating (Aslam and Rana, 2022).

Defining LCZs in an urban context today is possible through the LCZ-Generator application (Demuzere, Kittner and Bechtel, 2021); through guidelines, a satellite image recognition algorithm receives instructions from a technician, allowing it to represent the LCZ coverage for a given geographical area. The operation is partially automat-

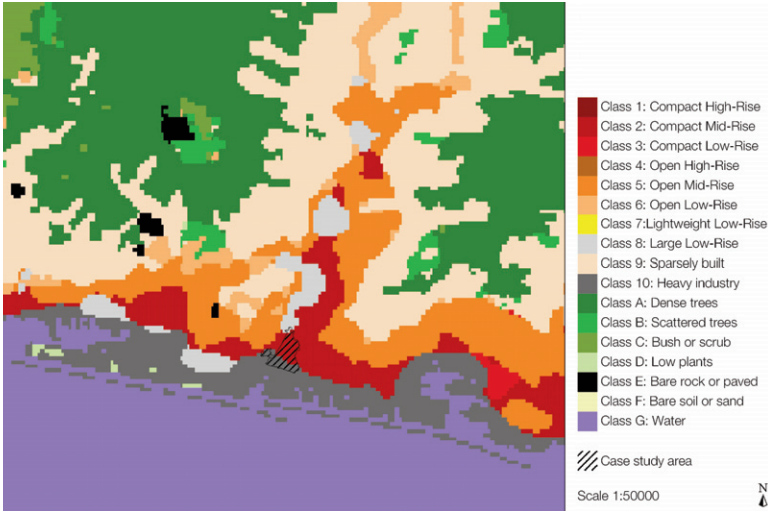


Fig. 7 | Genoa case study: Local Climate Zones map (credit: G. Oneto, 2023).

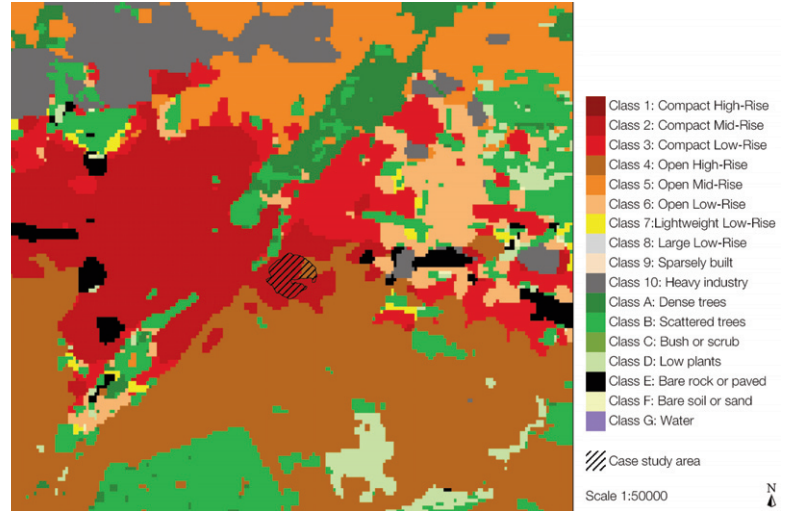


Fig. 8 | Munich case study: Local Climate Zones map (credit: G. Oneto, 2023).

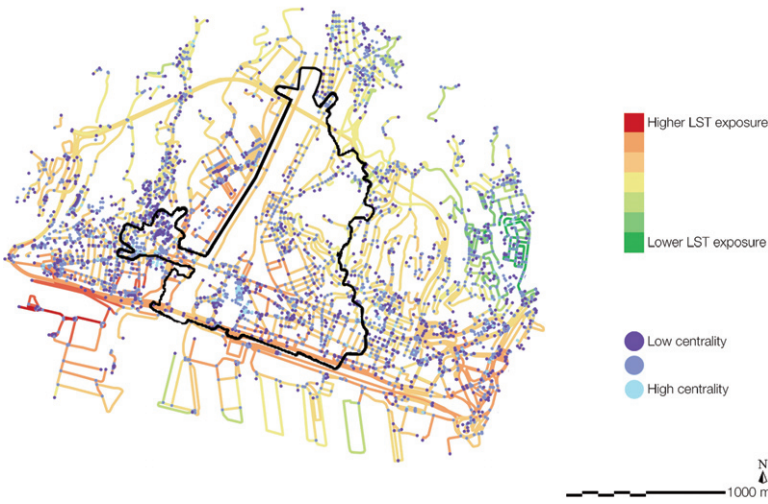


Fig. 9 | Genoa case study: street graph with LST impact and Between Centrality analysis (credit: G. Oneto, 2023).

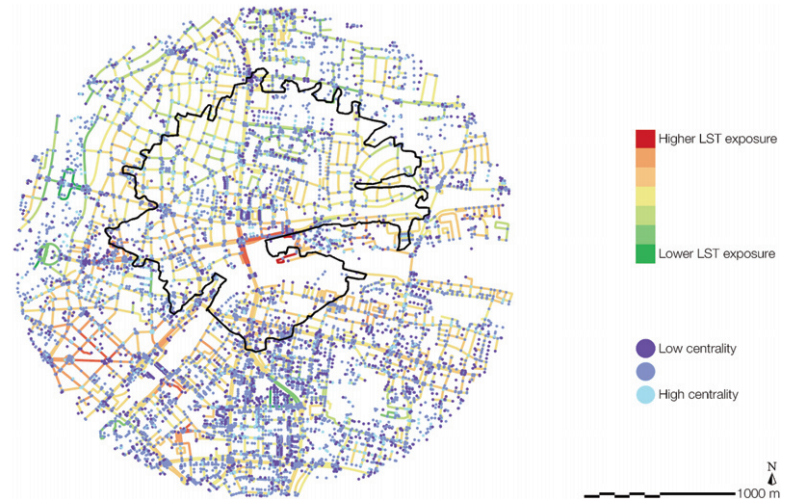


Fig. 10 | Munich case study: street graph with LST impact and Between Centrality analysis (credit: G. Oneto, 2023).

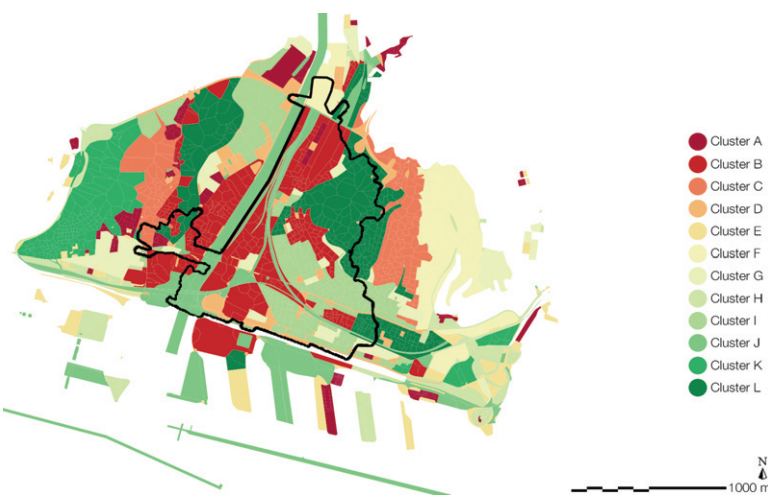


Fig. 11 | Genoa case study: LST Spatial Signatures over 'enclosed tessellation' (credit: G. Oneto, 2023).

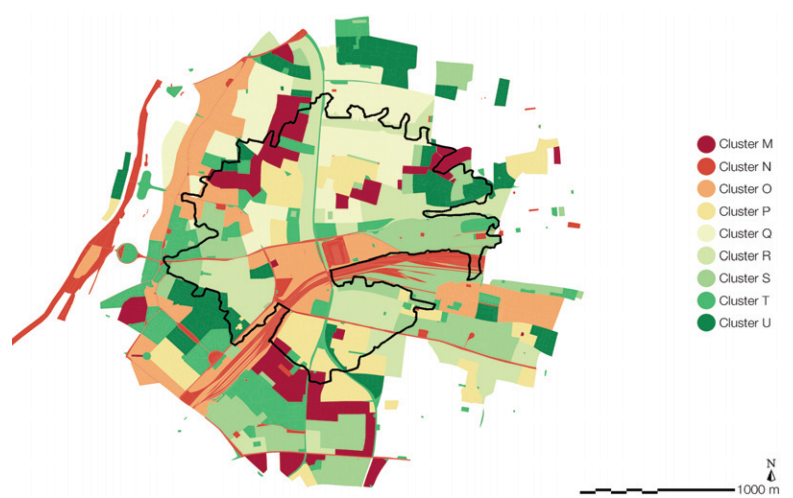


Fig. 12 | Munich case study: LST Spatial Signatures over 'enclosed tessellation' (credit: G. Oneto, 2023).

ic because it requires knowledge of the classification system and initial analogue mapping to instruct the recognition.

LCZs are significant at the urban scale. Therefore, the form originating in Genoa can help to un-

derstand the context in which the area in question is located, but it declines a more in-depth study to other representations. The Sampierdarena area, therefore, appears predominantly as a dense, compact low-rise fabric (class 3) adjacent to the

heavily industrial port area (class 10). However, the linear connotation of the coastal city undermines this square-shaped representation; for example, the wide industrial strip that characterises the entire coast actually masks a historicised res-

Application	Local Climate Zones analysis	Graph analysis	Tessellation analysis
Generic role in Urban Heat Island modelling	Effective at urban scale, highlights the urban-rural gradient	Effective at urban and neighbourhood scale, highlights the betweenness centrality (BC) of the mobility network	Effective at urban and neighbourhood scale, highlights the interaction of 2D and 3D building environment
Via Paolo Reti Genoa (Italy)	Mostly compact low-rise built environment (C3), does not distinguish between historical blocks and portual infrastructure	Clear difference between new expansion and pre-existing urban environment with higher overall UHI resilience (higher BC)	Higher overall heterogeneous thermal response of the built environment (12 clusters)
Einstein Strasse Munich (Germany)	Mostly compact mid-rise (C2) and open mid-rise (C2) built environment	Strong difference between new infrastructure and existing built environment with slightly higher resilience (medium-high BC)	Higher overall homogeneous thermal response of the built environment (8 clusters)

Tab. 1 | Results comparison from the three methodologies on the two case studies (credit: the Authors, 2023).

idential fabric, involving the old Darsena and the Molo with the same colour (Fig. 7).

Conversely, Munich allows the classification to be expanded, decompressing the city's space; consequently, the square fragmentation is articulated on a compact fabric made up of medium-height buildings (class 2). The district in question also involves open areas (class 4), composed of larger blocks with wide courtyards. The analysis helps in defining the border between the urban centre and the periphery, highlighting spatial differences induced by anthropic activity (Fig. 8).

The second map insists on the complexity of the infrastructural system alongside that of the slow mobility that characterises the daily life of residential neighbourhoods. Through the canyon effect, i.e. that ratio of road surface width and building height that characterises a corridor shape, roads often cause local thermal discomfort for people. Leveraging graph theory to analyse the road network in relation to overheating phenomena allows us to highlight the relationships between the different elements in terms of mathematical relationships (Mohamed et alii, 2021). A graph, i.e. a system characterised by objects, nodes and relationships in the form of orientable segments, can demonstrate its robustness and resilience by analysing its centrality. Centrality represents the importance of a node in the network, and in particular, node Betweenness Centrality evaluates the number of shortest paths that pass through each node or segment (Barthélemy, 2004). The maximum centrality in a network is an index of the system's resilience, that is, its ability to find alternative paths if one of these were to be discarded: this means that when faced with choosing which route to take, a more resilient system allows the pedestrian to choose the cooler one. The OSMNX Python library (Boeing, 2017) allows systems from all cities worldwide to be operated on and calculate these dimensions. The map, therefore, represents the roads that fall in territories most exposed to urban heat with a gradient, and, in each node, the local resilience is indicated through the calculation of centralities.

The Genoese case shows the difference between the historical peripheral residential neighbourhood and the new rapid roads; this relationship remains constant thanks to a mesh that follows the contours of the terrain and the Polcevera River. The thermal signature represents a sec-

ondary problem for slow mobility: small residential streets are, on average, less exposed to high temperatures and are connected by nodes with high centrality (Fig. 9). On the other hand, urban expansion is the context in which the road network of the case of Munich can be read: large longitudinal arteries run alongside the rail system that cuts through the analysed area, onto which the residential neighbourhoods are grafted. On average, it can be seen that moving away radially from the tram depot, the streets take on a more comfortable dimension. The representation of centrality allows for easy identification of preferential routes, in which the context and the particular orientation of the road axes play a fundamental role (Fig. 10).

The third mapping is based on the tessellation of the urban fabric with respect to the formal principle, i.e. the characteristics of the streets and buildings that represent the built environment, and the degree of thermal difference due to the surface temperature. The Enclosed Tessellations were developed in the English context to analyse complex environments, forming polygonal spatial modules obtained from data on the morphology and functional characteristics of the territory (Fleischmann and Arribas-Bel, 2022). In this logic, the generative algorithm of the criterion weighs and systematises the heterogeneous data, suggesting a subdivision of the city following human barriers such as roads, rivers, and railways, but also characteristics of the territory such as woodlands or traffic. The pieces are then grouped together, forming Spatial Signatures, a number of groupings specific to the case in question, representative of homogeneous categories of urban space.

In the cases of Genoa and Munich, the Enclosed Tessellations were calculated by deriving urban data from public databases such as Open Street Maps³ and Copernicus⁴. Instead of hybridising formal qualities with functional ones, such as the presence of restaurants in the area, Spatial Signatures were instead created with surface temperatures. On both maps, the study was extended to a diameter double that of the analysis to obtain results more representative of the local context.

The Genoese case produced twelve homogeneous groupings in terms of shape and response to thermal exposure: the fact that the garage, initially hypothesised as the local site of a particular thermal discomfort, falls together with the neigh-

bourhood's historic fabric (cluster I) is immediately significant. The portions that have the greatest impact on overheating are attributable to the former industrial area, now converted into a shopping district (cluster B); this example draws attention to the real risk of drawing hasty conclusions regarding the type of building without taking into consideration the context in which it is located (Fig. 11).

The Munich case produced fewer clusters than Genoa's, i.e., nine. The greater regularity may derive from the lower density of the city fabric, allowing larger blocks, parks, and wide-ranging spaces. The representation homologises the infrastructural network with the depots and open cemented areas (cluster O, N); on the other hand, attention is paid to the fragmented nature of the fabric behind it (cluster M, P, Q, R), composed of different buildings which, due to materials, shape and use of greenery, have a very different response to exposure to heat (Fig. 12).

The three different representation techniques are each composed of different rules: these principles collect the complexity of the urban fabric, analyse, and synthesise it and produce three different logics in the form of geometries and attributes (Tab. 1). The correspondence of the results was obtained by comparison with previous air temperature maps (Hooyberghs et alii, 2019). The repetition of homogeneous contexts results in an image that is necessarily similar, allowing us to compare different cities coming from different areas of the Earth: a module is the dimension and measure of repetition, and as such it is described precisely by rules and principles. Recognising and opening up these logics, sometimes left uncritically in the hands of technicians, instead allows Architects and Urban Planners to experience the complexity of cities first-hand. While Local Climate Zones may have relevance in dictating rules on a large scale, other tools are required when working at the neighbourhood level.

Graphs are widely used in urban analyses, whenever the road element and its characteristics become particularly relevant to the analysis. Using computational tools to analyse the infrastructural network allows us to better highlight relationships and connections, which would otherwise be difficult to appreciate. On the other hand, Tessellations are a large family of space subdivisions, of which the square grid is also part. The criterion for choice is the arbitrary nature of the definition of the polygonal that defines a tessellation: Enclosed Tessellations manage to hybridise the actual shape of the territory with heterogeneous data, which enrich and colour the mosaic of Spatial Signatures that is generated.

Conclusions | The module for the Architect and the Urban Planner is a dimensional classification criterion of the urban system that is recognisable, reproducible, and made up of principles and relationships. The analysis addressed in the two cases of Genoa and Munich draws attention to the existence of tools that a professional can adopt to push the analysis and verification of their hypotheses on urban fabrics. Support for local administrations often involves huge expenses and simulations, sometimes oversized compared to the real objectives. The ability to draw results directly from openly available data and validated by the

scientific community on the one hand, allows competitiveness to be improved and on the other, the transparency and objectivity of analysis to be demonstrated; in fact, the data used in the article comes entirely from databases validated by the European Union. The objectivity of the representations is instead given by the rigour with which these rules are established and followed; this must allow and accept, at times, small graphic aberrations produced by overlaps, edge effects or errors in the data themselves. The contribution of an expert on urban systems is once again instrumental in this case because they can provide a multi-scalar and multidisciplinary response to the problem.

The main limitations of the study are computational in nature. To limit complexity and compu-

tation time, reduced regions of space were selected. It is conceivable that the extension of the study area could have generated different homogeneous classes, leading to a different visual narrative. Greater relevance could also be given to the functional context of the territory, such as the use of the territory and the anthropic activities within. These aspects could enrich the classifications, demonstrating relationships that cannot be inferred from these maps.

If Local Climate Zones are a typical tool for studying heat islands, graphs and Spatial Signatures can be exploited by interrogating cities on different issues; for example, flash flooding due to increased rainfall can be analysed with similar logic. Furthermore, applying environmental and eco-

logical themes, such as habitat connectivity, can become a new generative rule for urban analysis modules, thus meeting sustainability logic that defines our cities' real urban habitats. Two conditions will be pursued in envisaging a continuation of the research using graphs and tessellations to investigate urban environments. The former concerns the data quality, that is, a more descriptive selection of urban heterogeneity, especially of a socio-economic nature. The latter concerns modelling, i.e. the extension of previous methods to larger and, consequently, more complex case studies; in this second phase, the process of validation and verification of the application of the different methodologies will be carried out.

Acknowledgements

The research is financed by the scholarship of G. Oneto, defined by the Italian Ministerial Decree no. 351 09/04/2022. The contribution is the result of a joint reflection of the Authors. Nonetheless, the introductory paragraph is to be attributed to A. Magliocco, 'Materials and Methodology' to G. Oneto, and 'Conclusions' to A. Magliocco and G. Oneto.

Notes

1) For further information, consult the webpage: earth.esa.int/eogateway/missions/landsat [Accessed 18 October 2023].

2) For further information, consult the webpage: land.copernicus.eu/en [Accessed 18 October 2023].

3) For further information, consult the webpage: openstreetmap.org/ [Accessed 18 October 2023].

4) For further information, consult the webpage: ghsl.jrc.ec.europa.eu/copernicus.php [Accessed 18 October 2023].

References

- Abrar, R., Sarkar, S. K., Nishtha, K. T., Talukdar, S., Shahfahad, Rahman, A., Towfiqul Islam, A. R. M. and Mosavi, A. (2022), "Assessing the Spatial Mappin of Heat Vulnerability under Urban Heat Island (UHI) Effect in the Dhaka Metropolitan Area", in *Sustainability*, vol. 14, issue 9, article 4945, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su14094945 [Accessed 18 October 2023].
- Arribas-Bel, D. and Fleischmann, M. (2022), "Spatial Signatures – Understanding (urban) spaces through form and function", in *Habitat International*, vol. 128, article 102641, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102641 [Accessed 18 October 2023].
- Aslam, A. and Rana, I. A. (2022), "The use of local climate zones in the urban environment – A systematic review of data sources, methods, and themes", in *Urban Climate*, vol. 42, article 101120, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101120 [Accessed 18 October 2023].
- Barthélemy, M. (2004), "Betweenness Centrality in Large Complex Networks", in *The European Physical Journal B*, vol. 38, issue 2, pp. 163-168. [Online] Available at: doi.org/10.1140/epjb/e2004-00111-4 [Accessed 18 October 2023].
- Boeing, G. (2017), "OSMnx – New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks", in *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 65, pp. 126-139. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.compenurbysys.2017.05.004 [Accessed 18 October 2023].
- Caniggia, G. and Maffei, G. L. (1982), *Composizione architettonica e tipologia edilizia – Lettura dell'edilizia di base*, vol. 1, Marsilio, Venezia.
- Demuzere, M., Kittner, J. and Bechtel, B. (2021), "LCZ Generator – A Web Application to Create Local Climate

Zone Maps", in *Frontiers in Environmental Science*, vol. 9, article 637455, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455 [Accessed 18 October 2023].

Dong, P., Jiang, S., Zhan, W., Wang, C., Miao, S., Du, H., Li, J., Wang, S. and Jiang, L. (2021), "Diurnally continuous dynamics of surface urban heat island intensities of local climate zones with spatiotemporally enhanced satellite-derived land surface temperatures", in *Building and Environment*, vol. 218, article 109105, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109105 [Accessed 18 October 2023].

Equere, V., Mirzaei, P. A. and Riffat, S. (2020), "Definition of a new morphological parameter to improve prediction of urban heat island", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 56, article 102021, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2020.102021 [Accessed 18 October 2023].

Fleischmann, M. and Arribas-Bel, D. (2022), "Geographical characterisation of British urban form and function using the spatial signatures framework", in *Scientific Data*, vol. 9, issue 1, article 546, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41597-022-01640-8 [Accessed 18 October 2023].

Gallo, K. and Xian, G. (2014), "Application of spatially gridded temperature and land cover data sets for urban heat island analysis", in *Urban Climate*, vol. 8, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.uclim.2014.04.005 [Accessed 18 October 2023].

Graells-Garrido, E., Serra-Burriel, F., Rowe, F., Cucchiatti, F. M. and Reyes, P. (2021), "A city of cities – Measuring how 15-minutes urban accessibility shapes human mobility in Barcelona", in *PLOS ONE*, vol. 16, issue 5, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1371/journal.pone.0250080 [Accessed 18 October 2023].

Heaviside, C., Macintyre, H. and Vardoulakis, S. (2017), "The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment", in *Current Environmental Health Reports*, vol. 4, pp. 296-305. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3 [Accessed 18 October 2023].

Hooyberghs, H., Berckmans, J., Lauwaet, D., Lefebvre, F. and De Ridder, K. (2019), *Climate variables for cities in Europe from 2008 to 2017*, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). [Online] Available at: doi.org/10.24381/cds.c6459d3a [Accessed 18 October 2023].

Joint Research Centre of the European Commission, Veneri, P., Moreno-Monroy, A., Maffeni, L. and Schiavina, M. (2019), *GHS-OCED functional urban areas – Public release of GHS FUA*, Publications Office of the European Union. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2760/67415 [Accessed 18 October 2023].

Manoli, G., Faticchi, S., Schläpfer, M., Yu, K., Crowther, T. W., Meili, N., Burlando, P., Katul, G. G. and Bou-Zeid, E. (2019), "Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population", in *Nature*, vol. 573, pp.

55-60. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9 [Accessed 18 October 2023].

Mohamed, M., Othman, A., Abotalib, A. Z. and Marjashi, A. (2021), "Urban heat island effects on megacities in desert environments using spatial network analysis and remote sensing data – A case study from western Saudi Arabia", in *Remote Sensing*, vol. 13, issue 10, article 1941, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.3390/rs13101941 [Accessed 18 October 2023].

Muratori, S. (1960), *Studi per una operante storia urbana di Venezia*, Istituto Poligrafico dello Stato, Libreria dello Stato, Roma.

Royal Meteorological Society (2017), "Urban Heat Islands", in *metMatters*, 01/10/2017. [Online] Available at: rmets.org/metmatters/urban-heat-islands [Accessed 18 October 2023].

Rozenstein, O., Qin, Z., Derimian, Y. and Karnieli, A. (2014), "Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS Using a Split Window Algorithm", in *Sensors*, vol. 14, issue 4, pp. 5768-5780. [Online] Available at: doi.org/10.3390/s140405768 [Accessed 18 October 2023].

Sangiorgio, V., Fiorito, F. and Santamouris, M. (2020), "Development of a holistic urban heat island evaluation methodology", in *Scientific Reports*, vol. 10, issue 1, article 17913, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41598-020-75018-4 [Accessed 18 October 2023].

Stewart, I. D. (2011), *Redefining the urban heat island*, PhD Thesis, University of British Columbia Theses and Dissertations. [Online] Available at: open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0072360 [Accessed 18 October 2023].

Stewart, I. D. and Oke, T. R. (2012), "Local Climate Zones for Urban Temperature Studies", in *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, issue 12, pp. 1879-1900. [Online] Available at: doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1 [Accessed 18 October 2023].

Tuholske, C., Caylor, K., Funk, C., Verdin, A., Sweeney, S., Grace, K., Peterson, P. and Evans, T. (2021), "Global urban population exposure to extreme heat", in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, issue 41, article e2024792118, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1073/pnas.2024792118 [Accessed 18 October 2023].

Valmassoi, A. and Keller, J. D. (2021), "How to visualize the Urban Heat Island in Gridded Datasets?", in *Advances in Sciences and Research*, vol. 18, pp. 41-49. [Online] Available at: doi.org/10.5194/asr-18-41-2021 [Accessed 18 October 2023].

van der Hoeven, F. and Wandl, A. (2015), *Rotterdam*, TU Delft Architecture and the Built Environment, Delft.

Wang, Z.-H. (2022), "Reconceptualizing urban heat island – Beyond the urban-rural dichotomy", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 77, article 103581, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2021.103581 [Accessed 18 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	15 September 2023
Revised	03 October 2023
Accepted	04 November 2023
Published	31 December 2023

PROGETTARE LE CASE DELLA COMUNITÀ

Applicazione dell'approccio modulare a un modello innovativo di presidio

DESIGNING COMMUNITY HOUSES

Application of the modular approach to an innovative model of facility

Riccardo Pollo, Elisa Biolchini, Valeria Scognamiglio

ABSTRACT

L'approccio modulare è ampiamente utilizzato in architettura e semplificare strutture complesse favorendone la flessibilità è una delle numerose motivazioni della scelta del modulo come strumento progettuale, specialmente nell'edilizia sanitaria. Il presente articolo illustra una ricerca applicata in cui la modularità è impiegata nel progetto delle Case della Comunità, specifiche strutture socio-sanitarie territoriali introdotte dal PNRR, attraverso schemi funzionali che, concertati con gli operatori sanitari di una ASL piemontese, garantiscono differenti aggregazioni delle unità spaziali elementari. L'obiettivo del paper è la comprensione, tramite la sperimentazione, dell'efficacia e delle potenzialità dell'approccio modulare nel processo di realizzazione di questi nuovi servizi socio-sanitari territoriali, analizzandone, attraverso la ricerca, il background, l'applicazione e i risultati.

The modular approach is widely used in architecture, and simplifying complex structures to enhance flexibility is one of the many reasons for choosing the module as a design tool, particularly in healthcare construction. This article presents an applied research project where modularity is employed in designing Community Houses, i.e. particular local socio-health structures introduced by the Italian National Recovery and Resilience Plan (PNRR). Functional schemes, developed in collaboration with healthcare professionals from a Piedmontese Local Health Authority (ASL), ensure different configurations of elementary spatial units. The paper aims to understand, through experimentation, the effectiveness and potential of the modular approach in implementing these new local socio-health services, analysing their background, application, and results.

KEYWORDS

casa della comunità, PNRR, flessibilità, progettazione modulare, assistenza socio-sanitaria

community house, Italian national recovery and resilience plan, flexibility, modular design, social and health care

Riccardo Pollo is an Associate Professor of Architectural Technology at Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio (DIST) of the Politecnico di Torino (Italy); he conducts research on environmental design at the urban and architectural scales with a focus on sustainability and the effects on people's health and well-being. He develops studies with public entities and territorial authorities on the quality of the urban environment and the design of social and healthcare facilities. E-mail: riccardo.pollo@polito.it

Elisa Biolchini is an Architect and PhD Candidate at the Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio of the Politecnico di Torino (Italy); she is mainly involved in research in the field of humanisation of health spaces, hospital design and social and health services. She also conducts her research on Healthy City issues and physical, psychological and social well-being related to the quality of indoor and outdoor spaces. E-mail: elisa.biolchini@polito.it

Valeria Scognamiglio, a collaborator at a Professional Architecture and Landscape Firm, has been researching care spaces and criteria and practices for the co-design of sociomedical spaces for the network of proximity territorial services with applications to the territory of the Piedmont Region, delving into organisational and typological schemes of the garisons. E-mail: valeria.scogna@gmail.com



Il concetto di modulo si qualifica nella duplice natura di elemento utile a determinare il proporzionamento di un insieme e quale unità elementare di un sistema: in termini generali la modularità rappresenta il principio secondo il quale un prodotto, un'organizzazione, un processo o un sistema complesso possono essere progettati in modo da essere suddivisi in elementi fisicamente o logicamente separabili (Bordignon, 2007). In tal senso il modulo si configura non come semplice entità metrica o geometrica ma come strumento che riduce la complessità (Langlois, 2002) e come fattore facilitante della flessibilità dei sistemi (Bask et alii, 2011), particolarmente significativo anche nell'ottica di una progettazione sostenibile dell'architettura (Herzog and Herzog, 2020).

Nel presente contributo la concezione modulare viene trattata nell'ambito del progetto architettonico sanitario, intrinsecamente legato a complesse regole e normative di carattere igienico, funzionale, tecnologico e ambientale condizionate dalle esigenze legate alle attività di cura. Sin dalle origini, il modello dell'edificio sanitario, rappresentato dall'ospedale, ha privilegiato attenzioni progettuali specifiche di carattere funzionale e ambientale adottando configurazioni degli spazi che favorissero il controllo del letto da parte del personale, la ventilazione e l'accesso della luce nella camera di degenza (Steadman, 2014). A partire dalla quattrocentesca Ca' Grandia di Milano sino ai nosocomi a padiglione ottocenteschi e ai monoblocchi degli anni '60 del Novecento, il modello ospedaliero è divenuto funzionalmente sempre più complesso aggiungendo agli spazi della degenza nuove aree specializzate: gruppi operatori, sale diagnostiche, dipartimenti di emergenza e laboratori di ricerca (Capolongo et alii, 2019).

Con l'aumento della complessità la natura sistemica dell'edificio sanitario enfatizza il tema delle relazioni tra le funzioni e il ruolo dei 'percorsi' che devono garantire connessioni rapide, tempestività di intervento e sicurezza nella prevenzione delle infezioni. Nel progetto dell'ospedale infatti prevalgono il diagramma organizzativo, i flussi di pazienti, di operatori e di farmaci e la logistica, coinvolgendo molti ambiti specialistici e ingegneristici (Carrara et alii, 2017a, 2017b). Tuttavia, come osserva Steen Eiler Rasmussen (1964), già nel 1750 l'Architetto danese Eigtved progetta l'Ospedale Frederik's di Copenaghen sulla base di una misura modulare corrispondente alle dimensioni di un posto letto di degenza. Anche il noto schema britannico Nucleus degli anni '70 si basa sull'aggregazione modulare di blocchi organizzati lungo assi distributivi che creano corti interne per garantire l'illuminazione naturale e permettere futuri ampliamenti e una costruzione per fasi (Capolongo, 2012).

E ancora, il sistema Harness elaborato in Gran Bretagna alla fine degli anni '70 si basa su una griglia di 15 x 15 metri che cerca di rispondere ai principi di flessibilità e di indeterminatezza (Capolongo, 2012); quest'ultima riafferma l'impossibilità di definire gli spazi abitati nel futuro poiché le esigenze e le funzioni sono in continua evoluzione e di conseguenza riconosce che un'organizzazione complessa non può essere ospitata in un edificio 'statico'. In quest'ottica il contenitore edilizio diviene un insieme di strutture connesse e interdipendenti in grado di crescere autonomamente per soddisfare nuove esigenze e l'indetermina-

tezza della forma dell'edificio risponde ai cambiamenti e agli sviluppi del programma (Capolongo, 2012; Rossi Prodi and Stocchetti, 1990). Tali presupposti costituiscono anche la base degli studi sull'architettura sanitaria sviluppati in Gran Bretagna dal National Health Service (NHS) con l'elaborazione di linee guida e analisi critiche dei diversi modelli che venivano applicati nei progetti realizzati (Department of Health, 2013).

La modularità è richiamata pure nella letteratura sul progetto contemporaneo dell'ospedale quale fattore di flessibilità e facilitazione nella fruizione (Wagenaar et alii, 2018): il modulo, per le sue intrinseche caratteristiche, si presta quindi alla progettazione degli edifici sanitari, connotati da una notevole complessità di funzioni e sistemi tecnologici e dalla rapida obsolescenza funzionale (Oberosler and Sacchetti, 2022). L'esigenza di rispondere a eventi emergenziali, come nel caso dell'epidemia da Covid-19, ha visto l'applicazione di strutture modulari prefabbricate in officina quali quella dell'Ospedale di Wuhan in Cina (Chen et alii, 2021). La prefabbricazione a cellule tridimensionali modulari già dotate di impianti e arredi sta trovando un sempre maggiore utilizzo in ambito ospedaliero sia nella realizzazione di nuove strutture e ampliamenti sia nell'allestimento di ambienti specializzati, quali le sale operatorie (Lawson et alii, 2014).

L'applicazione di schemi modulari si ricollega infine a ricerche importanti nella cultura progettuale e scientifica italiana nell'ambito dell'edilizia sanitaria, quali quelle di Paolo Verde (1984), di Roberto Palumbo (1993) e Ferdinando Terranova (2005) che hanno costituito il riferimento per il dimensionamento e l'articolazione dei presidi sanitari ospedalieri e territoriali.

Alla luce di queste premesse il contributo riporta gli esiti di una ricerca applicata¹ per la definizione di un modello architettonico sperimentale di presidio socio-sanitario territoriale di prossimità, la Casa della Comunità (CdC), di nuova costruzione, finalizzato alla costituzione di una linea guida per tre progetti da realizzare nell'ambito di una Azienda Sanitaria Locale (ASL) piemontese. Le CdC, sono state previste dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) per il rafforzamento della rete dell'assistenza territoriale, anche in risposta alle criticità evidenziate dalla pandemia Covid-19. Partendo dalla definizione e descrizione della tipologia del presidio si illustreranno la metodologia e le fasi operative che hanno riguardato l'intero lavoro con l'analisi esigenziale e l'individuazione dei requisiti, giungendo, infine, alla definizione degli schemi funzionali modulari, attraverso un costante confronto con la letteratura e i casi studio.

Le Case della Comunità | Gli interventi previsti dal PNRR per la valorizzazione della sanità territoriale sono focalizzati sul potenziamento dell'assistenza domiciliare e sulla realizzazione di nuove strutture sanitarie territoriali, ampliando la disponibilità di servizi di prossimità e definendo un nuovo assetto istituzionale per la prevenzione in ambito sanitario, ambientale e climatico, con un approccio integrato del tipo One Health e una visione olistica ispirata al concetto di Planetary Health (Ministero della Salute, 2022a). Il modello organizzativo della CdC è delineato dal Decreto Ministeriale n. 77 del 2022 con l'obiettivo di rispondere ai bisogni sociali e sanitari su tutto il territorio

nazionale in diverse situazioni demografiche, urbanistiche e sociali, prevedendo due diverse tipologie di Case della Comunità (Hub e Spoke), a seconda dell'ampiezza della gamma di servizi diagnostici e di continuità assistenziale forniti, e una presenza medica in tutti i giorni della settimana e nelle ore notturne (Ministero della Salute, 2022b).

L'organizzazione socio-sanitaria territoriale, caratterizzata sia da punti di riferimento fisici, come le Case della Comunità, gli Ospedali di Comunità e i Consultori Familiari, sia da figure di supporto, come gli infermieri di famiglia o di comunità, è rappresentata nella Figura 1, mentre la Tabella 1 riporta l'articolazione dei servizi da prevedere nelle CdC che comprendono le cure primarie, l'assistenza domiciliare, l'integrazione con i servizi sociali e infermieristici e altri, in alcuni casi obbligatori e in altri facoltativi.

Il modello di CdC deve quindi proporre un nuovo tipo di presidio caratterizzato dalla 'prossimità' per rispondere alla domanda di salute della comunità nell'ambito dei servizi offerti dal Sistema Sanitario Nazionale (SSN). Tali servizi devono garantire i Livelli Essenziali di Assistenza (LEA), articolati dalla legislazione in tre categorie: Prevenzione collettiva e sanità pubblica; Assistenza distrettuale dei servizi sanitari e sociali diffusi sul territorio (nei quali la CdC può giocare un ruolo importante); Assistenza ospedaliera (Ministero della Salute, 2022b).

La CdC mira a superare il carattere sanitario dei poliambulatori rispondendo a un'esigenza di 'prossimità' che allude all'integrazione dei servizi nell'ambiente urbano e alla vicinanza in termini funzionali, sociali e psicologici ai cittadini, riconoscendo le reti sociali e le comunità di riferimento quali determinanti della salute (Longo and Barsanti, 2021). In questa prospettiva tali strutture devono integrarsi nel contesto culturale nel quale si trovano rafforzando il legame tra tali reti (Hoa et alii, 2019): un tale modello non può prescindere quindi da un lavoro interdisciplinare tra le scienze mediche e sociali e le discipline dell'architettura, specialmente considerando il carattere inedito delle funzioni che vi si svolgeranno (Budde et alii, 2017); solo così il progetto potrà assecondare le esigenze organizzative e supportare comportamenti virtuosi ed efficaci (Setola, 2022).

Metodologia e fasi operative della ricerca | L'obiettivo della ricerca ha richiesto che l'analisi dei bisogni di cura fosse espletata di concerto con gli operatori sanitari territoriali (attraverso workshop di co-design condotti in tutto il corso del 2022), definendo regole chiare per il progetto della rete dei presidi di prossimità intesi quali sistemi di spazi riconoscibili e integrati in contesti urbani differenti. Inoltre i vincoli temporali, di risorse finanziarie e di rispetto dei requisiti ambientali, dettati dal Regolamento Europeo 2020/852 (European Parliament, 2020) attraverso il principio del Do No Significant Harm (DNSH), hanno richiesto un'attenta valutazione degli aspetti tecnologici e processuali.

Il lavoro si è svolto in tre fasi principali (Fig. 2). La prima è stata dedicata alla definizione del background scientifico nell'ambito delle linee guida, delle indicazioni normative e della letteratura, nonché all'analisi delle esigenze espresse dagli operatori sanitari attraverso sessioni di co-design. Parallelamente a queste attività è stata condotta una lettura critica dei Centri Socio-Sanitari Territoriali

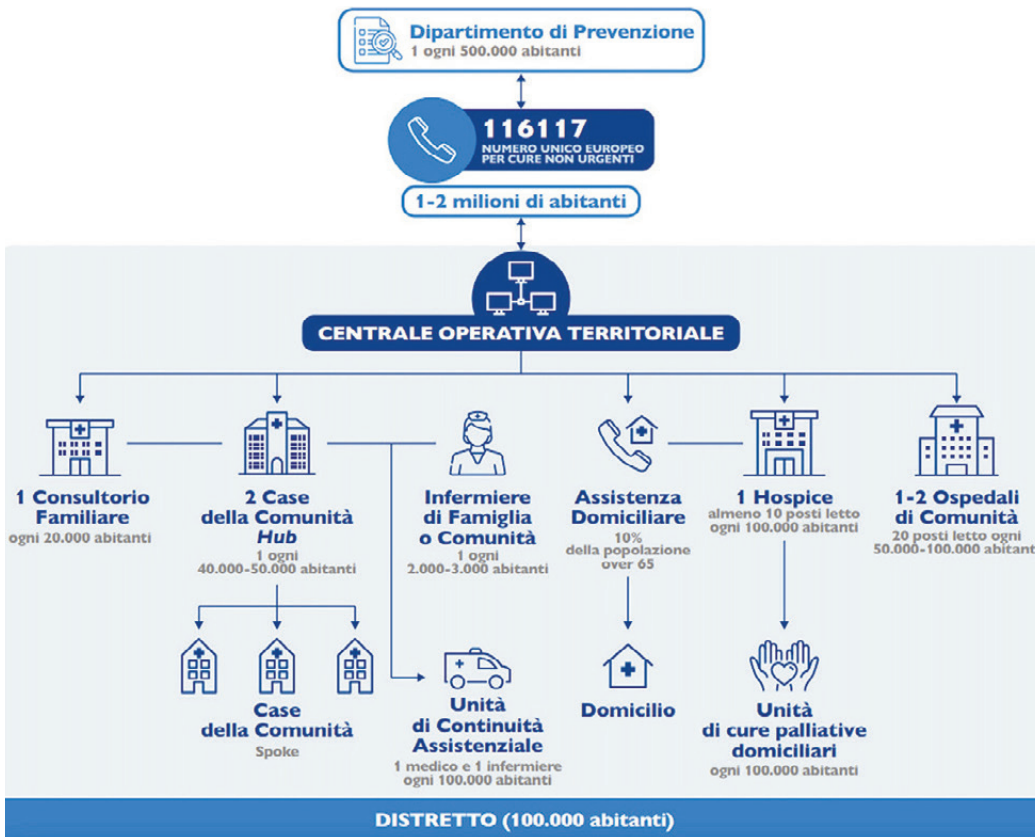


Fig. 1 | Summary diagram of the district organisation and the relationships between Community Houses, Community Hospitals and Territorial Operations Centres (source: AGENAS, 2022).

(Community Health Centres) più significativi descritti nella letteratura scientifica e nella pubblicistica nazionale e internazionale (Brambilla and Maciocco 2016, 2022; AGENAS, 2022) e una schedatura degli edifici (Perino et alii, 2023), anche tramite approfondimenti diretti con i progettisti.

La seconda fase, a partire dall'individuazione dei requisiti ambientali e tecnologici derivanti dal quadro esigenziale e dalle buone pratiche, ha portato all'elaborazione dei modelli funzionali e alla esemplificazione di diverse declinazioni dell'articolazione degli spazi nelle loro relazioni funzionali e fisiche.

La terza e ultima fase ha visto la definizione dimensionale delle unità ambientali modulari e delle loro aggregazioni, verificandone la capacità di soddisfare i requisiti espressi nella prima fase in termini sia di qualità degli spazi che di rispondenza del sistema tecnologico al quadro normativo. Tale verifica è stata condotta nel rispetto dei vincoli esterni reali dei tre siti di progetto riguardanti forma dei lotti, orientamento e contesto, e anche in relazione al quadro dei requisiti tecnologici e ambientali imposti dal PNRR.

L'analisi della normativa e l'indagine critica di numerosi esempi internazionali hanno condotto allo sviluppo di prime ipotesi utilizzate nelle sessioni di co-design con gli operatori socio-sanitari e con i tecnici della Regione Piemonte e orientate alla definizione delle esigenze in termini di spazi e di tempi del loro utilizzo per le funzioni socio-sanitarie previste nelle CdC. A partire da questo approccio si è quindi svolto un processo di definizione qualitativa delle unità ambientali e spaziali rispondenti alle attività e alle esigenze emerse dai workshop con gli operatori socio-sanitari (Fig. 3). Gli schemi progettuali sono stati costruiti tenendo conto

del contesto ambientale ed esigenziale dei tre siti oggetto dell'intervento, diversi per bacino di utenza, forma e caratteristiche dei lotti. La variabilità delle esigenze, nelle diverse situazioni territoriali, ha richiesto un'impostazione flessibile e adattabile nel rispetto degli standard di servizio e dei livelli di assistenza previsti. Il riferimento a funzioni definite dalla normativa ha imposto l'adozione di criteri di dimensionamento comuni suggerendo il modulo come strumento concettuale e operativo per affrontare la complessità che caratterizza la progettazione di un nuovo presidio socio-sanitario territoriale.

L'approccio modulare è stato inoltre mutuato dalle linee guida britanniche HBN 11 'Facilities for primary and community care services' del 2013: tale documento esplicita la modularità quale fattore di flessibilità e adattabilità attraverso il 'modular sizing concept' e suggerisce di adottare un 'modular approach' per la progettazione standardizzando le taglie dei locali e il posizionamento delle dotazioni impiantistiche (Department of Health, 2013). Diversi i vantaggi che un tale approccio determina: infatti se da un lato impiegare edifici modulari aiuta a raggiungere rigorosi obiettivi energetici e un basso fabbisogno energetico attraverso l'adozione di standard di isolamento termico più elevati (Fifield et alii, 2018), dall'altro, nel caso specifico delle CdC del PNRR e per i tempi molto limitati di attuazione dei progetti, la costruzione modulare può favorire una produzione più rapida e sicura, un'ottimizzata gestione dei tempi, un migliore impiego delle risorse e un maggiore rispetto dell'ambiente (Ferdous et alii, 2019).

L'analisi dei casi studio e la lettura critica delle linee guida (AGENAS, 2022; Department of Health, 2013) hanno fornito indicazioni sulle caratteristiche tecnologiche dell'involucro edilizio e del siste-

ma edificio-impianto; in particolare nell'analisi dei casi studio sono state considerate le caratteristiche tecnologiche costruttive e gli aspetti di eco-compatibilità relativi all'uso dei materiali da costruzione e all'integrazione di impianti per lo sfruttamento delle energie rinnovabili.

Analisi della letteratura e casi studio | La ricerca sulla letteratura ha fatto emergere, a livello nazionale, una continuità di studi che è passata dalle elaborazioni successive allo sviluppo della Legge 833/78 (Verde, 1985) all'esperienza della Casa della Salute², introdotta come sperimentazione dalla riforma Turco del 2007 poi concretizzatasi in numerose esperienze soprattutto nelle regioni Emilia Romagna e Toscana (Brambilla and Maciocco 2016). In molte realtà britanniche sono presenti i Centri Sanitari Territoriali del National Health Service (NHS) che offrono servizi della medicina di base in funzione delle esigenze specifiche a integrazione delle strutture di cura intermedie e degli ospedali. Le attività di cura in Europa si sono diversificate facendo dell'ospedale un luogo di alta specializzazione e ricerca, massimizzando le attività di cura e prevenzione sul territorio. A questa esigenza rispondono i Community Health Centres presenti nei sistemi britannico, francese, spagnolo, ecc. (Brambilla and Maciocco 2016, 2022) e sviluppati a seconda della declinazione dei diversi Servizi Sanitari Nazionali.

Il rapporto col territorio è quindi emerso, a livello nazionale e internazionale, quale elemento chiave dell'assistenza sanitaria, specialmente rispetto a quella primaria (Brambilla and Maciocco 2016, 2022). Per questo motivo durante il lavoro di ricerca si è proceduto a individuare dei casi studio assimilabili per funzioni e ruolo all'interno del sistema sanitario, alle CdC (Figg. 4-7) e la loro analisi si è rivelata utile al progetto per comprendere come altri Paesi gestiscano la sanità territoriale (con quali tipologie architettoniche) e individuare strategie replicabili in altri contesti.

I casi studio sono stati selezionati e classificati secondo criteri di localizzazione (in aree urbane centrali, periferiche e rurali), di funzione (sanitarie e sociali), di dimensione (circa 1.000 mq) e di qualità ambientale (comfort termo-igrometrico, psico-sensoriale, lavorativo e accessibilità) così da avere riferimenti quanto più assimilabili alle CdC. Sono state quindi realizzate delle schede (Perino et alii, 2023; Figg. 8-10) in cui riportare le informazioni generali, come localizzazione e descrizione delle attività, e le caratteristiche specifiche degli edifici; le qualità spaziali interne ed esterne sono state analizzate in modo critico per mettere in evidenza quali tra esse potessero favorire o impedire il raggiungimento di un buon livello di benessere per gli utenti, in termini di comfort psico-sensoriale, fruibilità edilizia e sicurezza.

Nell'analisi condotta è stata volta particolare attenzione all'influenza degli spazi sugli aspetti bio-psico-sociali enfatizzando le strategie e le scelte architettoniche a supporto di tale approccio. Gli edifici presi in esame sono stati analizzati seguendo uno schema interpretativo mirato a evidenziare le specifiche soluzioni adottate dai progettisti allo scopo di favorire il comfort psico-sensoriale degli utenti, attraverso vedute su spazi esterni gradevoli, disponibilità di luce naturale, relazione con elementi naturali, ecc. (Del Nord, Marino and Peretti, 2015). È importante sottolineare, a tal proposito,

che a livello internazionale si è sviluppata negli ultimi trent'anni un'articolata letteratura che mette in relazione la qualità dell'ambiente fisico con il gradimento degli utenti e l'efficacia delle cure (Mason, 2006; Ulrich et alii, 2004).

Nell'analisi dei casi studio sono state considerate inoltre le tecnologie costruttive, i materiali utilizzati, i dispositivi di controllo ambientale passivo e gli impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili. Dall'indagine emerge che in più di un terzo dei casi sono state adottate tecnologie di involucro con soluzioni passive, quali serre e brise-soleil, e in alcuni casi sono stati installati impianti alimentati da fonti rinnovabili e biomassa. L'uso delle tecniche di prefabbricazione piana con pannelli in Cross-Laminated Timber (CLT) e telai in legno è presente in numerosi esempi (Fig. 11), in particolare spagnoli (Cap de Riells) e francesi (Vaud-Vacon e La Chapelle Saint-Mesmin), dimostrando adatta alle diverse configurazioni planimetriche dei presidi socio-sanitari territoriali (Perino et alii, 2023).

Analisi esigenziale e individuazione dei requisiti

Nello sviluppo del progetto sono stati considerati i requisiti ambientali e tecnologici, sia nelle fasi di costruzione che in quella funzionale, e sono state condotte valutazioni qualitative sul fine vita. Gli strumenti progettuali utilizzabili per la definizione delle esigenze presenti e future degli utenti sono quelli dell'analisi esigenziale-prestazionale, introducendo specifiche modalità di coinvolgimento degli utilizzatori allo scopo di definire soluzioni congruenti con gli obiettivi prefissati (Cocina et alii, 2019). Focalizzando l'attenzione sulle modalità di coinvolgimento dell'utente attivamente, si è passati da una progettazione 'per l'utente' a una 'con l'utente' (Sanders and Stappers, 2008).

Dal confronto con gli operatori sanitari sono emerse la difficoltà di individuare a priori la modalità di erogazione di alcuni servizi e la necessità di prevedere funzioni specifiche solo in determinate realtà territoriali. Poiché la CdC si inserisce in un sistema organizzativo e in un quadro epidemiologico che può variare nel tempo e che si adatta a contesti definiti, dal confronto è emersa l'esigenza di mantenere la flessibilità nell'uso degli spazi, prevedendo diverse configurazioni degli stessi rispetto a esigenze specifiche e considerando l'articolazione dei servizi una variabile rispetto alle diverse realtà territoriali. In altri termini si è reso necessario prevedere locali con caratteristiche dimensionali tali da renderli versatili nell'uso e tenere conto di necessità diverse legate alle prestazioni, al numero dei sanitari e alle caratteristiche demografiche ed epidemiologiche del bacino di utenza; un'ulteriore richiesta prevedeva la riconoscibilità degli edifici e la loro caratterizzazione socio-sanitaria per distinguerli dagli ospedali, dai presidi territoriali della medicina specialistica o da altre strutture di ricovero.

Sulla base del quadro esigenziale delineato sono stati individuati i requisiti da considerare nella definizione del modulo e delle sue possibili aggregazioni (Tab. 2): la fruibilità a scala di organismo

edilizio legata alla facilità di orientamento dell'utente all'interno della struttura e alla leggibilità delle funzioni, l'efficienza energetica e il comfort termigrometrico tramite l'impiego di fonti di energia rinnovabile e di materiali performanti per l'isolamento termico e il comfort psico-sensoriale strettamente connesso a criteri di umanizzazione degli spazi.

Definizione dei moduli | L'analisi delle esigenze e le indicazioni del Decreto Ministeriale n. 77 del 2022 hanno portato all'individuazione delle attività e delle unità spaziali. Le linee guida AGENAS per le CdC hanno fatto emergere, inoltre, il tema dell'articolazione delle aree di cure primarie e specialistiche, dell'assistenza di prossimità e dell'integrazione con i servizi sociali. La definizione dei moduli, tenuto conto di tutte queste indicazioni, è stata guidata proprio da una distinzione tra ambienti con una maggiore caratterizzazione medica, quali gli ambulatori, e aree con una valenza sociale, come il punto di accoglienza e i locali per gli assistenti sociali; i servizi generali e logistici sono stati considerati alla pari del resto degli spazi nella costruzione dei moduli.

Un ulteriore riferimento rispetto alle linee guida AGENAS erano le indicazioni contenute nella Health Building Note HBN 11 (Department of Health, 2013); in tale documento sono presi in considerazione sia gli aspetti localizzativi che dimensionali relativi ai

locali destinati alle principali funzioni: la modularità suggerita dalle HBN 11, quale criterio per il dimensionamento, individua quattro dimensioni per le superfici degli ambienti delle strutture sanitarie dedicate alle cure primarie: 8, 12, 16 e 32 mq. Le indicazioni normative italiane sugli standard dimensionali dei locali ambulatoriali impongono invece una superficie netta minima di 12 mq per l'attività diagnostica e di cura corrispondente all'area di pertinenza del lettino, necessaria per un carrello, un armadio per i farmaci e una piccola scrivania; in considerazione di un ulteriore spazio per l'anamnesi e per il colloquio la superficie considerata idonea e adottata è pari a circa 16 mq.

Alla luce dello studio delle linee guida e delle normative nazionali e internazionali, nel progetto è stato individuato un modulo base di circa 16,5 mq che ha costituito la griglia di riferimento: dall'aggregazione dei suddetti moduli, tramite la traslazione delle partizioni, è possibile ottenere spazi di dimensioni diverse, ambulatori della superficie di 16,5 mq e 12 mq nonché locali di deposito serventi di circa 8 mq (Fig. 12). Al fine di ottimizzare illuminazione e aerazione naturale e vista sull'esterno, nella progettazione dei locali di diagnosi, colloquio e cura, particolare attenzione si è dedicata a disporre le finestre in modo da potere servire locali di diverse dimensioni. Affinché l'organismo edilizio risultasse flessibile e adattabile alle di-

Services	Organisational model	
	Community Health Centre 'hub'	Community Health Centre 'spoke'
Primary care services delivered through multi-professional teams (GPs, PLS, SAIs, IFoC, etc.)	Required	
Single Point of Access	Required	
Home care service	Required	
Outpatient specialist services for high prevalence diseases	Required	
Nursing services	Required	
Integrated reservation system linked to the ASL CUP (Unified Centre for Reservation)	Required	
Integration with Social Services	Required	
Community participation and enhancement of co-production	Required	
Connection with the corresponding Casa della Comunità hub	-	Required
Medical presence	Required H24, 7/7 days	Required H12, 6/7 days
Nursing presence	Required H24, 7/7 days Strongly recommended H24, 7/7 days	Required H12, 6/7 days
Basic diagnostic services	Required	Optional
Continuity of care	Required	Optional
Blood sample collection	Required	Optional
Counselling activities and activities for minors	Required	Optional

Tab. 1 | Services provided in Community Houses Centres by Italian Ministerial Decree no. 77 of 23 May 2022, 'Regulations setting out models and standards for developing territorial care in the National Health Service' (source: Ministero della Salute, 2022b).

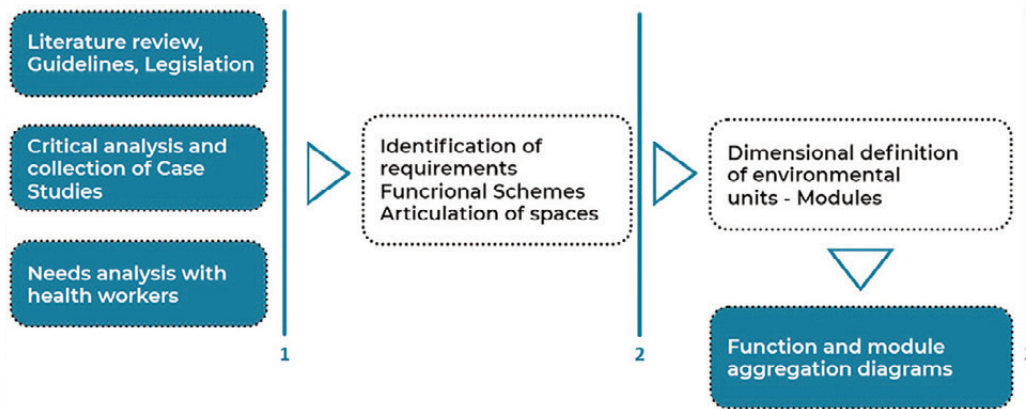


Fig. 2 | Stages of the Community House model design process.

Fig. 3 | The Co-design Workshop with social and health workers.



verse esigenze le partizioni interne perpendicolari alle chiusure esterne sono state disposte in modo da permettere sia il rispetto dei vincoli dimensionali sopra definiti sia un'ideale illuminazione e ventilazione naturale. L'adozione di finestre binate e di un interasse del modulo pari a 4,2 metri ha consentito di soddisfare sia i vincoli dimensionali degli spazi interni sia la loro flessibilità distributiva, a garanzia della quale si è prevista la collocazione delle canalizzazioni degli impianti esclusivamente nelle chiusure perimetrali e all'estradosso dei controsoffitti (Fig. 13).

Schemi funzionali modulari | La Health Building Note britannica, seguendo uno schema per certi versi analogo a quello delle Linee Guida AGENAS, attua una distinzione tra area pubblica, area clinica e area di staff: la prima ospita il punto di accoglienza e le attività consultoriali e deve avere un carattere non medicalizzato, accogliente e familiare; gli arredi devono essere di tipo domestico, si deve prevedere la vista sull'esterno, la luce deve essere prevalentemente naturale, i colori delle pareti gradevoli ma caratterizzanti; l'area clinica deve essere collocata in posizione più defilata per garantire una maggiore privacy e un uso agevole anche da parte degli operatori; occorre prevedere ambienti destinati al ristoro e alle riunioni del personale in una zona separata da quella pubblica e clinica.

Seguendo i criteri già descritti nei precedenti paragrafi sono stati elaborati schemi aggregativi in forma lineare, a pettine, compatta a corpo quintuplo e settuplo, a L (Fig. 14), tutti capaci di adattarsi a lotti di forma diversa e a posizioni specifiche degli accessi. Quale scelta preliminare è stata mantenuta l'elevazione a un solo piano fuori terra.

Aspetti tecnologici e costruttivi | Oltre a influenzare la definizione delle unità ambientali e degli schemi di aggregazione – si pensi alla modularità dimensionale e alla standardizzazione degli spazi – i requisiti della flessibilità e adattabilità determinano precisi vincoli anche per le tecnologie costruttive dei subsistemi edilizi e impiantistici. Per tale ragione si sono adottate soluzioni che hanno permesso di utilizzare tecnologie diversificate a seconda dei contesti produttivi locali, garantendo comunque una adeguata durabilità, manutenibilità, utilizzo di materiali ecocompatibili e gestione del fine vita. Si è considerata, comunque, la possibilità di adottare sia tecnologie strutturali e di involucro

ispirate a un sistema 'tradizionale evoluto' (parzialmente prefabbricato) sia sistemi di prefabbricazione 'a secco', in legno o in acciaio: la chiarezza e la semplicità dell'impianto planimetrico ammettono tanto una forte applicazione dell'off-site quanto la semplificazione del cantiere 'ad umido', lasciando al momento della definizione esecutiva la scelta più adatta all'ambito locale.

La scelta di un insediamento a un solo livello fuori terra offre diversi vantaggi tra cui la realizzazione di un apparato di fondazione ridotto, l'assenza di scale e ascensori, la predisposizione di fonti di luce naturale zenitale utile sia al benessere psico-sensoriale sia al contenimento dei consumi energetici e la collocazione di impianti fotovoltaici integrati in copertura. Da un punto di vista strutturale la modularità spaziale dettata dalle esigenze di flessibilità d'uso e di adattabilità illustrate appare coniugabile con l'adozione di moduli costruttivi sia bidimensionali che tridimensionali. Quale elemento fortemente sottolineato nell'analisi esigenziale dai tecnici degli uffici che curano gestione e manutenzione del patrimonio edilizio emerge l'importanza della prestazione di manutenibilità, in particolare degli impianti: la scelta di collocare le dorsali impiantistiche a soffitto e nelle chiusure perimetrali risponde, oltre che alla citata flessibilità, alla possibilità di intervenire facilmente su forniture fluidiche ed energetiche senza dover impegnare tutti gli spazi e condurre lunghe e impattanti opere murarie.

Conclusioni | Il contributo ha inteso dimostrare le potenzialità, in termini di replicabilità, tempi di realizzazione e prestazioni, dell'approccio modulare alla progettazione di un presidio socio-sanitario innovativo, quale la CdC, evidenziandone la versatilità nella concezione e il soddisfacimento dell'ampia gamma di requisiti, anche inediti, che lo caratterizzano. Si vuole in tal modo contribuire all'apertura di un dibattito architettonico e tecnologico sugli edifici socio-sanitari, con l'obiettivo di promuovere la qualità dei progetti in questo ambito.

L'adozione del criterio di modularità nella definizione degli spazi necessari a soddisfare il programma indicato dal DM 77/22 e dall'analisi esigenziale ha consentito di elaborare nell'ambito della ricerca una relativamente vasta gamma di schemi e ipotesi planimetriche sviluppate nel rispetto dei principi di flessibilità e adattabilità. La molteplicità delle soluzioni planimetriche realizzabili dimostra la versatilità del metodo utilizzato pur man-

tenendo alcuni elementi architettonici e tecnologici ricorrenti, quali la scansione e la tipologia delle aperture (Figg. 15, 16); tale caratteristica, unitamente alla cura architettonica delle aree di accesso e alle relazioni con i contesti, può favorire la riconoscibilità dei presidi da parte dell'utenza, aderendo alle indicazioni dei documenti di indirizzo normativo (Ministero della Salute, 2022b).

La struttura modulare, oltre a permettere l'uso degli spazi per le diverse attività previste, consente nelle soluzioni sviluppate un'agevole razionalizzazione degli impianti e delle attività manutentive; in aggiunta l'individuazione di alcuni elementi della costruzione di dimensione standardizzata riduce i costi di costruzione, anche nella prospettiva di procedure di appalto unificate per i tre presidi oggetto della sperimentazione, di gestione e di manutenzione. Gli schemi modulari sono infatti compatibili con i sistemi costruttivi più diffusi, sia con quelli industrializzati sia con i diversi livelli di prefabbricazione, anche nelle ipotesi più avanzate di off-site (Goh and Goh, 2019), e si prestano alla riduzione imposta ai tempi di realizzazione, come nel caso delle CdC del PNRR.

A conclusione del lavoro di ricerca l'approccio modulare è stato adottato nelle linee guida per i progettisti dei tre interventi previsti dalla ASL TO5 con una sensibile semplificazione delle procedure, pur senza scendere nella proposta di un'unica soluzione architettonica ripetibile. La sperimentazione appare quindi avere mostrato l'efficacia di un approccio modulare al progetto di un modello di presidio socio-sanitario flessibile e adattabile.

Un limite della ricerca, che ha riguardato una sola realtà territoriale seppur legata a programmi nazionali e regionali, è l'essere riferita alla sola fase preliminare dell'elaborazione del modello, pur con approfondimenti specifici di carattere tecnologico, impiantistico ed energetico. Inoltre la ricerca ha interessato una sola tipologia di presidio, peraltro ancora poco diffusa poiché basata su una normativa e impostazione innovativa dei servizi socio-sanitari territoriali, ciò in ragione del fatto che tanto nella pratica architettonica quanto in letteratura non sono ancora presenti esperienze di progettazione di queste strutture. In tal senso un ulteriore confronto su una più ampia scala con altri presidi – quali le Case della Salute che per la loro storia hanno anticipato alcuni aspetti della Casa della Comunità – potrà essere utile all'affinamento di modelli progettuali e soluzioni tecnologiche.

Il consolidamento di una prassi di analisi critica dei progetti, in particolare dei presidi di sanità pubblica, appare importante anche per l'elaborazione e l'aggiornamento di linee guida e documenti tecnici di indirizzo del progetto, seguendo la direzione in cui si sono mossi da tempo alcuni Paesi, quali la Gran Bretagna, con le citate HBN. A seguito dello studio effettuato e dell'attuazione dei progetti potrà essere interessante, quale sviluppo della ricerca, lo svolgimento di una post-occupancy evaluation che analizzi e convalidi il processo e le strategie progettuali modulari adottate.

The concept of module qualifies in the dual nature of an element helpful in determining the proportioning of a whole and as an elementary unit of a system: in general terms, modularity represents the principle according to which a product, organisation, process or complex system can be designed in such a way as to be divided into physically or logically separable elements (Bordignon, 2007). In this sense, the module is configured not as a simple metric or geometric entity but as a tool that reduces complexity (Langlois, 2002) and as a facilitating factor in systems flexibility (Bask et alii, 2011), which is also particularly significant from the perspective of sustainable architectural design (Herzog and Herzog, 2020).

In this paper, the modular concept is dealt with in the context of healthcare architectural design, which is intrinsically linked to complex rules and regulations of a hygienic, functional, technological and environmental nature conditioned by the needs related to care activities. From its origins, the model of the healthcare building, represented by the hospital, has favoured specific design attentions of a functional and environmental nature by adopting space configurations that favoured staff control of the bed, ventilation and light access to the patient room (Steadman, 2014). Beginning with the 15th-century Ca' Granda in Milan to the 19th-century nosocomial and monobloc pavilions of the 1960s, the hospital model has become increasingly complex functionally by adding new specialised areas, the operating groups, diagnostic rooms, emergency departments, and research laboratories to the inpatient spaces (Capolongo et alii, 2019).

As complexity increases, the systemic nature of the healthcare building emphasises the issue of relationships between functions and the role of 'pathways' that must ensure rapid connections, timeliness of intervention and safety in infection prevention. Indeed, the organisational diagram, flows of patients, operators, drugs and logistics prevail in hospital design, involving many specialised and engineering fields (Carrara et alii, 2017a, 2017b). However, as Steen Eiler Rasmussen (1964) notes, as early as 1750, the Danish Architect Eigtved designed Frederik's Hospital in Copenhagen based on a modular measure corresponding to the size of an inpatient bed. The well-known British Nucleus scheme of the 1970s is also based on the modular aggregation of blocks organised along distributive axes that create internal courtyards to provide natural lighting and allow for future expansions and phased construction (Capolongo, 2012).

Furthermore, the Harness system developed in Britain in the late 1970s is based on a 15 x 15-

meter grid and sought to respond to the principles of flexibility and indeterminacy (Capolongo, 2012); the latter reaffirms the impossibility of defining inhabited spaces in the future since needs and functions are constantly changing and consequently recognises that a complex organisation cannot be accommodated in a 'static' building. In this view, the building container becomes a set of connected and interdependent structure that can grow independently to meet changing needs, and the indeterminacy of the building form responds to program changes and developments (Capolongo, 2012; Rossi Prodi and Stocchetti, 1990). These assumptions also form the basis of the studies on healthcare architecture developed in Great Britain by the National Health Service (NHS) with the development of guidelines and critical analyses of the different models applied in the projects implemented (Department of Health, 2013).

Modularity is invoked as well in the literature on contemporary hospital design as a factor of flexibility and facilitation in fruition (Wagenaar et alii, 2018): the module, due to its inherent characteristics, is therefore suitable for the design of healthcare buildings, which are connoted by considerable complexity of functions and technological systems and rapid functional obsolescence (Oberosler and Sacchetti, 2022). The need to respond to emergency events, such as the Covid-19 outbreak, has seen the application of prefabricated modular shop-floor structures such as that of Wuhan Hospital in China (Chen et alii, 2021). Three-dimensional modular cell prefabrication, already equipped with systems and furnishings, is finding increasing use in hospital settings in the construction of new structures and expansions and the outfitting of specialised environments such as operating rooms (Lawson et alii, 2014).

Finally, the application of modular schemes is related to significant research in Italian design and scientific culture in the field of healthcare construction, such as those of Paolo Verde (1984), Roberto Palumbo (1993) and Ferdinando Terranova (2005), which have been the reference for the sizing and articulation of hospital and territorial health care facilities.

In light of these premises, the paper reports the outcomes of an applied research¹ for the definition of an experimental architectural model of a newly built experimental territorial social-health garrison, the Community House, aimed at establishing a guideline for three projects to be implemented within a Piedmontese Local Health Authority (ASL). The Community Houses were envisaged by the Italian National Recovery and Resilience Plan (PNRR) to strengthen the network of territorial care, also in response to the critical issues highlighted by the Covid-19 pandemic. Starting from the definition and description of the praesidium typology, the methodology and operational steps that covered the entire work with the exigency analysis and identification of requirements will be illustrated, finally arriving at the definition of the modular functional schemes, through constant comparison with the literature and case studies.

Community Houses | The interventions envisaged by the Italian PNRR for the enhancement of territorial health care are focused on the strengthening of home care and the construction of new territorial health structures, expanding the availability of

proximity services and defining a new institutional set-up for prevention in health, environment and climate, with an integrated approach of the One Health type and a holistic vision inspired by the Planetary Health concept (Ministero della Salute, 2022a). The organisational model of the Community Houses is outlined by Italian Ministerial Decree No. 77 of 2022 with the aim of responding to social and health needs throughout the country in different demographic, urban and social situations, providing two different types of Community Houses (Hub and Spoke), depending on the breadth of the range of diagnostic and continuity



Fig. 4 | Maison de Santé Jugon Les Lacs, France (source: Perino et alii, 2023).

Fig. 5 | Rammed Earth Health Hub in Newman, Australia (source: Perino et alii, 2023).

Fig. 6 | Health Clinic in Ruukki, Finland (source: Perino et alii, 2023).

Fig. 7 | Livsrum Cancer Counseling Centre in Næstved, Denmark (source: Perino et alii, 2023).



CAP di Riells I Viabrea

SITO

Riells I Viabrea, Catalogna, Spagna

ANNO

2021

PROGETTISTI

Comas Pont arquitectes

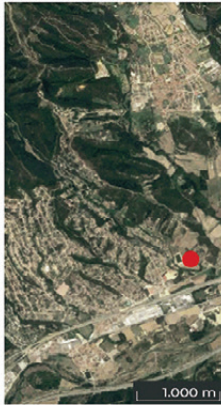
SUPERFICIE

566 m²

DESCRIZIONE

La struttura ospita un centro per le cure primarie e si sviluppa principalmente su un livello. L'edificio è organizzato in due blocchi funzionali, uno per il personale, a nord, che comprende ambienti per il ristorante e le riunioni, e uno dedicato alle attività ambulatoriali e agli spazi accessibili ai pazienti, a sud. Le zone di attesa sono distribuite lungo due assi longitudinali, davanti ai singoli ambulatori e si affacciano su un patio lineare che permette di avere un costante rapporto con gli spazi esterni e una buona illuminazione.

La facciata ventilata con lamiera grecata laccata permette di realizzare elementi di chiusura e di protezione solare microforati che garantiscono elevati livelli di privacy agli utenti.



1.000 m



100 m

LOCALIZZAZIONE

Il CAP del piccolo centro di Riells I Viabrea si trova nella Provincia di Girona ai piedi del Parco Naturale del Montseny, in un'area ai margini dell'abitato. L'accesso principale, facilmente individuabile grazie alla presenza di uno spiazzo e un albero, si trova su una strada poco trafficata e si può raggiungere a piedi, con la bicicletta o con la macchina. Il secondo ingresso è collegato a un campo da calcio e al suo parcheggio.



Comfort visivo

- 12 Adeguata illuminazione naturale e artificiale
- 13 Visibilità all'esterno
- 14 Assenza di disturbo visivo (abbagliamento...)

Ampie vetrate (solo in parte schermate dal rivestimento della facciata), illuminazione artificiale lineare. Vista all'esterno da tutti i locali. Tutti gli spazi, compresi quelli di comunicazione sono dotati di aperture verso l'esterno. Il progetto si adatta all'ambiente naturale introducendo il paesaggio all'interno dell'edificio anche attraverso il piccolo cortile centrale lineare. Sono presenti elementi in facciata in lamiera microforata che proteggono dalla radiazione solare.

Comfort psico-sensoriale

- 15 Impatto emotivo percettivo
- 16 Condizioni di privacy, socialità
- 17 Controllo spazio
- 18 Riduzione stato di ansia e stress
- 19 Relazioni con la natura
- 20 Stimolazione sensoriale e presenza di opere d'arte

Spazi connotati da molta luce, colori prevalentemente neutri e uso del legno. Nell'area comune delle sale d'attesa, la struttura in legno è stata lasciata a vista. Negli studi medici sono stati scelti colori neutri e finiture color legno, per trasmettere una sensazione di calore. Le facciate sono rivestite con una pelle metallica ondulata, microforata davanti alle finestre, che garantisce un buon livello di privacy agli ambienti interni dell'edificio. Non sono presenti spazi nascosti alla vista. Dall'ingresso e dai corridoi si controlla visivamente tutto lo spazio dell'area pubblica. I materiali naturali o che richiamano degli elementi organici impiegati sia per gli elementi interni che esterni, le ampie vetrate degli spazi di attesa e le strategie per massimizzare la privacy, generano un ambiente accogliente. Stretta connessione tra gli spazi interni dell'edificio e la natura circostante, specialmente negli spazi di attesa. La maggior parte degli alberi esistenti lungo il fiume sono stati conservati e lo stesso numero di quelli che sono stati rimossi, per esigenze costruttive, sono stati piantati. L'illuminazione naturale e la costante vista verso l'esterno creano spazi stimolanti. L'uso del legno è un ulteriore stimolo sia visivo che tattile.

Informazione/comunicazione

- 21 Sistema di accoglienza
- 22 Riconoscibilità del personale

La reception non si trova direttamente nello spazio d'ingresso, non è immediatamente visibile in quanto posizionata lateralmente e quindi non si ha subito l'impatto con il desk. La hall è preceduta da uno spazio filtro. Il personale di accoglienza ha uno spazio specifico all'ingresso.



Fig. 8-10 | Exemplification of case study sheets (source: Perino et alii, 2023).

Fig. 11 | The construction site of the Health Centre in Vaud-Vacon, France: the wooden frame structure is visible.

Next page

Tab. 2 | Table of Community House design requirements.

of care services provided, and a medical presence on all days of the week and at night (Ministero della Salute, 2022b).

The territorial social-health organisation, characterised both by physical landmarks such as Community Houses, Community Hospitals and Family Counseling Centres and by support figures such as family or community nurses, is depicted in Figure 1; at the same time, Table 1 shows the articulation of services to be provided in Community Houses, which include primary care, home care, integration with social and nursing services and others, in some cases mandatory and in others optional.

Therefore, the Community House model must propose a new type of praesidium characterised by 'proximity' to respond to the community's demand for health within the services offered by the NHS. These services must guarantee the Essential Levels of Care, articulated by legislation into three categories: Collective prevention and public health; District care of health and social services spread throughout the territory (in which the Community House can play an important role); Hospital care (Ministry of Health, 2022b).

Community Houses aim to overcome the health-care character of outpatient clinics by responding to a need for 'proximity' that alludes to the integration of services in the urban environment and proximity in functional, social and psychological terms to citizens, recognising social networks and communities of reference as determinants of health (Longo and Barsanti, 2021). In this perspective, such structures must integrate into the cultural context in which they are located by strengthening the link between these networks (Hoa et alii, 2019): such a model cannot, therefore, disregard interdisciplinary work between the medical and social sciences and the disciplines of architecture, especially considering the unprecedented nature of the functions that will take place there (Budde et alii, 2017); only in this way can the design accommodate organisational needs and support virtuous and effective behaviours (Setola, 2022).

Methodology and operational phases of the research | The research objective required that the analysis of care needs be carried out in consultation with territorial health care providers (through co-design workshops conducted in 2022), defining clear rules for the design of the network of proximity garrisons understood as systems of recognisable and integrated spaces in different urban contexts. In addition, the constraints of time, financial resources, and compliance with environmental requirements, dictated by European Regulation 2020/852 (European Parliament, 2020) through the principle of Do No Significant Harm (DNSH) required careful evaluation of technological and process aspects.

The work was carried out in three main phases (Fig. 2). The first was devoted to defining the scientific background in the context of guidelines, regulatory guidance and literature, as well as analysing the needs expressed by health professionals through co-design sessions. Parallel to these activities, a critical reading of the most significant territorial Community Health Centres described in the scientific literature and national and international publicity (Brambilla and Maciocco 2016, 2022; AGENAS, 2022) and a filing of the

	Requirements	
Architectural, technical-functional quality and usability at the neighbourhood scale	Adequate level of landscape integration with the context	
	Compliance with urban planning constraints	
	Geological, geomorphological, hydrogeological compatibility	
	Compliance with hydrogeological constraints	
	Ease of access	
	Ease of locating the facility's entrance	
Usability at the building scale	Recognizability of the structure and replicability of the design model	
	Ease of orientation within the facility	
	Readability of functions	
	Accessibility and inclusivity, even for people with reduced / compromised physical and mental abilities	
Eco-friendliness and sustainability	Flexibility and resilience	
	Adaptability	
	Compliance with the principle of DNSH	
	Efficiency of transportation and logistics processes important for various project phases	
	Environmentally sound waste management	
	Use of materials and elements with low environmental impact	
	Reduction of drinking water consumption	
	Use of renewable sources of energy for heating, cooling, and domestic hot water	
	Nearly 0 energy nZEB building	
	Use of thermal insulation	
Energy efficiency and hygro-thermal comfort	Use of thermal inertia	
	Air permeability of exterior windows and doors	
	Wind resistance of glazed envelope surfaces	
	Water tightness of exterior windows and doors and the opaque envelope	
	Use of natural and mechanical ventilation	
	Control of phenomena due to condensation	
	Adequate natural and artificial lighting	
	Visibility of pleasant outdoor spaces	
Visual Comfort	Absence of visual disturbance (glare, etc.)	
	Building acoustic requirements	
Acoustic comfort	Psycho-sensory comfort (humanisation)	
Safety and security		Colour design
		Privacy protection and social interaction
		Reduction of anxiety and stress
	Occupational well-being	
Efficiency of transport and logistics systems in the various phases of the building project and maintenance	Protection from damage to health	
	Protection against the spread of infections	
	Protection from intrusion	
	Protection against fire	
	Structural safety	
Information and Communication	MEP safety	
	Construction site safety and organisation	
Building Management	Cultural mediation and reception services	
	Maintainability	
	Durability	

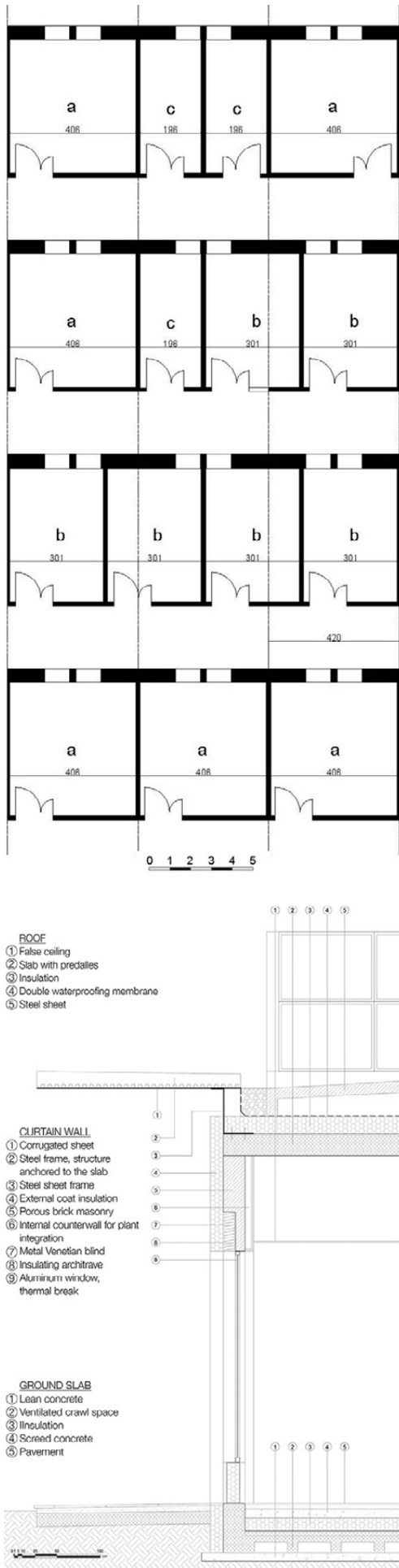


Fig. 12 | 'Flexible' floor plans of outpatient (16 sqm, 13 sqm) and storage (9 sqm) spaces.

Fig. 13 | Technology section of the model design.

buildings (Perino et alii, 2023) was conducted, including through direct insights with designers.

The second phase, starting with the identification of environmental and technological requirements derived from the demanding framework and best practices, led to the development of functional models and the Exemplification of different declinations of the articulation of spaces in their functional and physical relationships.

The third and final phase involved the dimensional definition of the modular environmental units and their aggregations, verifying their ability to meet the requirements expressed in the first phase in terms of both the quality of the spaces and the compliance of the technological system with the regulatory framework. This verification was conducted as much with respect to the actual external constraints of the three project sites concerning lot shape, orientation and context as with respect to the framework of technological and environmental constraints imposed by the Italian PNRR.

The analysis of the regulations and the critical investigation of numerous international examples led to the development of initial hypotheses used in the co-design sessions with the social-health workers and with the technicians of the Piedmont Region and oriented toward the definition of the needs in terms of spaces and the timing of their use for the social-health functions envisaged in the Community Houses. From this approach, a process of qualitative and quantitative analysis of environmental and spatial units corresponding to the activities and needs that emerged from the workshops with the social-health workers was then carried out (Fig. 3).

The design schemes were constructed taking into account the environmental and demand context of the three target sites, which differ in the catchment area, shape and characteristics of the lots. In the different territorial situations, the variability of needs required a flexible and adaptable approach while respecting the service standards and levels of care provided. The reference to services defined by the legislation required the adoption of common sizing criteria suggesting the form as a conceptual and operational tool to deal with the complexity of the design of a new territorial social-health facility.

The modular approach has also been borrowed from the 2013 UK HBN 11 'Facilities for primary and community care services' guidelines: this document makes modularity explicit as a factor of flexibility and adaptability through the 'modular sizing concept' and suggests adopting a 'modular approach' for design by standardising room sizes and in the placement of plant equipment (Department of Health, 2013). There are several advantages that such an approach brings about: in fact, while employing modular buildings helps to achieve stringent energy targets and low energy requirements through the adoption of higher thermal insulation standards (Fifield et alii, 2018), in the specific case of the Italian PNRR Community Houses and because of the very limited timeframe for project implementation, modular construction can promote faster and safer production, optimised time management, better use of resources, and greater environmental friendliness (Ferdous et alii, 2019).

Analysis of the case studies and critical reading of the guidelines (AGENAS, 2022; Department

of Health, 2013) provided insights into the technological characteristics of the building envelope and the building-plant system; in particular, construction technology characteristics and eco-friendly aspects related to the use of building materials and the integration of renewable energy systems were considered in the case study analysis.

Literature analysis and case studies | The literature search has revealed, at the national level, a continuity of studies that has gone from the elaborations following the development of Law 833/78 (Verde, 1985) to the experience of the House of Health², introduced as an experiment by the 2007 Turco reform then materialised in numerous experiences, especially in the Emilia Romagna and Tuscany regions (Brambilla and Maciocco 2016). In many British realities, there are NHS Territorial Health Centers, which offer primary care medicine services according to specific needs to complement intermediate care structures and hospitals. Care activities in Europe have diversified by making the hospital a place of high specialisation and research, maximising care and prevention activities in the local area. Community Health Centres present in the British, French, Spanish, etc. systems respond to this need (Brambilla and Maciocco 2016, 2022) and developed according to the declination of different NHSs.

The relationship with the territory has thus emerged, nationally and internationally, as a key element of health care, especially with respect to primary care (Brambilla and Maciocco 2016, 2022). For this reason, during the research work, case studies were identified that were assimilated, in terms of functions and role within the health care system, to Community Houses (Fig. 4-7). The analysis of the case studies proved useful for the Community Houses project to understand how other countries manage territorial healthcare (with which architectural types) and to identify strategies that can be replicated in other contexts. Case studies were selected and classified according to criteria of location (in central urban, suburban, and rural areas), function (health and social), size (about 1,000 sqm), and environmental quality (thermo-hygrometric comfort, psycho-sensory, occupational, and accessibility) to have references as similar as possible to Community Houses. Sheets were then made (Perino et alii, 2023; Fig. 8-10) in which to report general information, such as location and description of activities, and specific characteristics of the buildings; internal and external spatial qualities were critically analysed to highlight which among them could favour or impede the achievement of a good level of well-being for users, such as psycho-sensory comfort, building usability, and safety.

In the analysis, special attention was paid to the influence of spaces on bio-psycho-social aspects by emphasising architectural strategies and choices to support this approach. The buildings examined were analysed by following an interpretive scheme aimed at highlighting the specific solutions adopted by designers in order to promote users' psycho-sensory comfort through views of pleasant outdoor spaces, availability of natural light, relationship with natural elements, etc. (Del Nord, Marino and Peretti, 2015). It is important to note, in this regard, that internationally, a comprehensive literature has developed over the past

three decades that relates the quality of the physical environment to user satisfaction and effectiveness of care (Mason, 2006; Ulrich et alii, 2004). Construction technologies, materials used, passive environmental control devices and renewable energy systems were also considered in the analysis of the case studies. The survey shows that in more than one-third of the cases, envelope technologies with passive solutions, such as greenhouses and brise-soleil, were adopted; in some cases, systems powered by renewable energy sources and biomass were installed. The use of flat prefabrication techniques with Cross-Laminated Timber (CLT) panels and wooden frames can be found in numerous examples (Fig. 11), particularly Spanish (Cap de Riells) and French (Vaud-Vacon and La Chapelle Saint-Mesmin), proving to be suitable for the different planimetric configurations of territorial social-health facilities (Perino et alii, 2023).

Exigent analysis and requirements identification | Environmental and technological requirements were considered in the development of the project, both in the construction and functional phases, and qualitative end-of-life assessments were conducted. The design tools that can be used to define the present and future needs of users are those of exigency-performance analysis, introducing specific ways of involving users to define solutions congruent with the set objectives (Cocina et alii, 2019). Focusing on how to involve the user with an active role has shifted from designing 'for the user' to designing 'with the user' (Sanders and Stappers, 2008). Discussions with health professionals revealed the difficulty of identifying a priori the mode of delivery of certain services and the need to provide specific functions only in certain territorial settings. Since the Community House fits into an organisational system and an epidemiological framework that can change over time and adapt to defined contexts, the comparison revealed the need to maintain flexibility in the use of spaces, providing for different configurations of them with respect to specific needs and considering the articulation of services a variable with respect to different territorial realities. In other words, it was necessary to provide rooms with dimensional characteristics to make them versatile in use and to take into account different needs related to services, the number of sanitarians and the demographic and epidemiological characteristics of the catchment area; a further request included the recognizability of the buildings and their socio-health characterisation to distinguish them from hospitals, territorial garrisons of specialised medicine or other inpatient facilities.

Based on the outlined demanding framework, the requirements to be considered in defining the module and its possible aggregations were identified (Tab. 2): usability at the scale of the building organism related to ease of user orientation within the structure and legibility of functions, energy efficiency and thermo-hygrometric comfort through the use of renewable energy sources and high-performance materials for thermal insulation, and psycho-sensory comfort closely related to criteria of humanisation of spaces are some of the requirements identified in this research.

Definition of modules | Needs analysis and Ital-

ian Ministerial Decree No. 77 guidelines of 2022 led to identifying activities and space units. In addition, the AGENAS guidelines for Community Houses brought out the theme of the areas of primary and specialised care, proximity care and integration with social services. The definition of the modules, taking into account all these indications, was guided precisely by a distinction between environments with a greater medical characterisation, such as outpatient clinics, and areas with a social value, such as the reception point and rooms for social workers; general and logistical services were considered on a par with the rest of the spaces in the construction of the modules.

A further reference with respect to the AGENAS guidelines was the indications contained in the Health Building Note HBN 11 (Department of Health, 2013); in that document, both locational and dimensional aspects related to the rooms intended for the main functions are taken into consideration: the modularity suggested by the HBN 11, as a criterion for sizing, identifies four dimensions for the surfaces of the rooms of health structures dedicated to primary care: 8, 12, 16 and 32 sqm. On the other hand, the Italian regulatory indications on the dimensional standards for outpatient rooms impose a minimum net area of 12 sqm for diagnostic and treatment activities corresponding to the area pertaining to the crib, necessary for a trolley, a medicine cabinet and a small desk; in consideration of an additional space for history taking and interviewing, the area considered suitable and adopted is about 16 sqm.

In the light of the study of national and international guidelines and regulations, a basic module of about 16.5 sqm was identified in the project, which formed the reference grid: from the aggregation of the modules mentioned above, through the translation of partitions, it is possible to obtain spaces of different sizes, ambulatory rooms of 16.5 sqm and 12 sqm as well as servant storage rooms of about 8 sqm (Fig. 12). In the assumption of equipping the diagnosis, interview and treatment rooms with lighting, natural ventilation and views to the outside, special care was taken to arrange the windows so that they could serve rooms of different sizes. For the building organism to be flexible and adaptable to different needs, the internal partitions perpendicular to the external enclosures were arranged in such a way as to allow both compliance with the dimensional constraints defined above and suitable natural lighting and ventilation. The adoption of paired windows and a module spacing of 4.2 meters made it possible to satisfy both the dimensional constraints of the interior spaces and their distributional flexibility, to ensure which it was planned to locate the plant ducts exclusively in the perimeter closures and at the extrados of the false ceilings (Fig. 13).

Modular Functional Schemes | The British Health Building Note, following a pattern in some ways similar to that of the AGENAS Guidelines, implements a distinction between public area, clinical area and staff area: the former houses the reception point and consultation activities and should have a nonmedicalised, welcoming and homelike character; furnishings should be domestic, views to the outdoors should be provided, the light should be predominantly natural, and wall colours pleasant but characterising; the clinical area should be

located in a more secluded position to ensure greater privacy and easy use even by operators; rooms for refreshments and staff meetings should be provided in an area separate from the public and clinical areas.

Following the criteria already described in the previous sections, aggregate schemes were developed in linear, comb-shaped, compact quintuple- and septuple-body, and L-shaped forms (Fig. 14), all of which are capable of adapting to differently shaped lots and specific locations of accesses. As a preliminary choice, a single-story elevation above ground was retained.

Technological and construction aspects | In addition to influencing the definition of environmental units and aggregation schemes - think of dimensional modularity and standardisation of spaces - the requirements of flexibility and adaptability also determine precise constraints for the construction technologies of building and plant subsystems. For this reason, solutions were adopted that allowed the use of diversified technologies according to local production contexts, while still ensuring adequate durability, maintainability, use

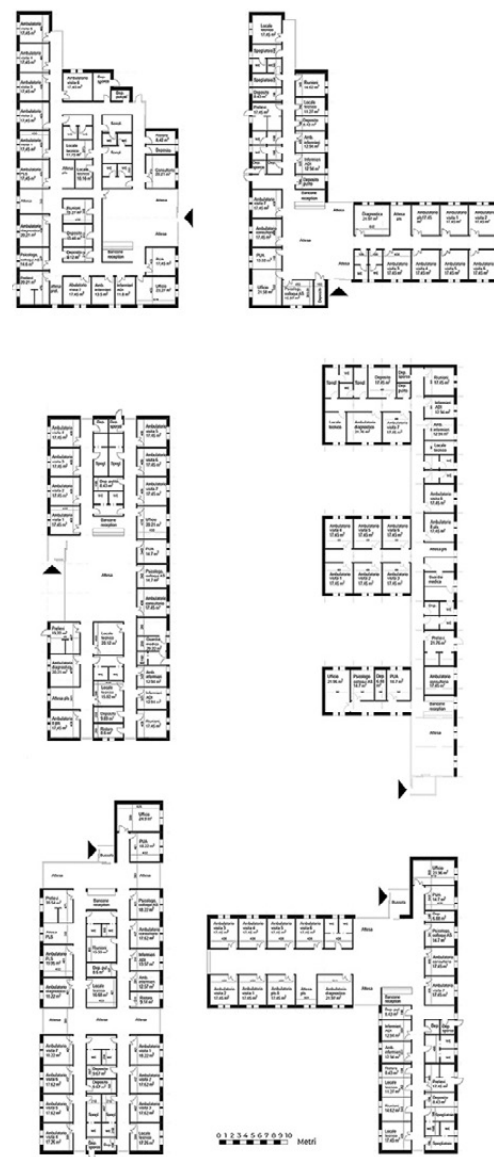


Fig. 14 | Design examples of the modular schemes with different plan arrangements: septuple-body, quintuple-body, 'L-shaped' and comb-shaped.



Figg. 15, 16 | Views of the Community House model in the quintuple body aggregation (drawings by V. Maruccia).

of environmentally friendly materials and end-of-life management. However, the possibility of adopting both structural and envelope technologies inspired by a ‘traditional evolved’ system (partially prefabricated) and ‘dry’ prefabrication systems, in wood or steel, was considered: the clarity and simplicity of the plan layout allow both a strong application of off-site and the simplification of the ‘wet’ construction site, leaving the choice best suited to the local context to the executive definition.

The choice of a single-level settlement above ground level offers several advantages, including the realisation of a reduced foundation apparatus, the absence of stairs and elevators, the provision of zenithal sources of natural light useful both for psycho-sensory well-being and the containment of energy consumption, and the placement of photovoltaic systems integrated with the roof. From a structural point of view, the spatial modularity dictated by the needs of the flexibility of use and adaptability illustrated appears to be conjugable with the adoption of both two- and three-dimensional building modules. As an element strongly emphasised in the exigency analysis by the technicians of the offices in charge of management and maintenance of the building heritage emerges the importance of maintainability performance, particularly of the systems: the choice of placing the plant backbones in the ceiling and the perimeter closures responds, in addition to the flexibility mentioned above, to the possibility of easily

intervening on fluidic and energy supplies without having to commit all the spaces and conduct long and impactful masonry works.

Conclusions | This paper aimed to demonstrate the potential, in terms of replicability, construction time and performance, of the modular approach to the design of an innovative social-healthcare facility, such as the Community House, highlighting its versatility in design and the fulfilment of the wide range of requirements, including novel ones, that characterise it. It is thus intended to contribute to the opening of an architectural and technological debate on social-health buildings, with the aim of promoting the quality of projects in this field.

The adoption of the criterion of modularity in defining the spaces required to meet the program indicated by Italian Ministerial Decree 77/22 and by the exigency analysis made it possible to elaborate within the scope of the research a relatively wide range of schemes and planimetric hypotheses developed in compliance with the principles of flexibility and adaptability. The multiplicity of planimetric solutions that can be realised demonstrates the versatility of the method used while maintaining some recurring architectural and technological elements, such as the scansion and type of openings (Figg. 15, 16); this feature, together with the architectural care of the access areas and the relationships with the contexts, can promote the recognizability of the garrisons by users,

adhering to the indications of the regulatory guidance documents (Ministero della Salute, 2022b).

In addition to allowing the use of spaces for the different activities envisaged, the modular structure allows in the developed solutions an easy rationalisation of facilities and maintenance activities; in addition, the identification of some elements of the construction of standardised size reduces construction costs, also in the perspective of unified procurement procedures for the three principals under experimentation, operation and maintenance. Modular schemes are compatible with the most common construction systems, both industrialised and different levels of prefabrication, even in the most advanced off-site hypotheses (Goh and Goh, 2019), and lend themselves to the reduction imposed on construction time, as in the case of the Community Houses of the Italian PNRR.

At the conclusion of the research work, the modular approach was adopted in the design guidelines for the designers of the three interventions planned by ASL TO5 with a significant simplification of procedures, while not expiring in the proposal of a single repeatable architectural solution. Thus, the experimentation appears to have shown the effectiveness of a modular approach in designing a flexible and adaptable socio-healthcare facility model.

A limitation of the research, which covered only one territorial reality albeit linked to national and regional programs, is that it referred only to the preliminary phase of model elaboration, albeit with specific in-depth studies of technological, plant engineering and energy nature. In addition, the research concerned only one type of garrison, which is still not very widespread since it is based on an innovative regulation and setting of territorial social-health services; this is due to the fact that both in architectural practice and in literature, there are still no experiences of design of these structures. In this sense, further comparison on a larger scale with other principals – such as the Health Homes, which by their history have anticipated some aspects of the Community House – may be useful for the refinement of design models and technological solutions.

The consolidation of a practice of critical analysis of projects, particularly of public health principals, also appears important for the development and updating of guidelines and technical project guidance documents, following the direction in which some countries, such as Great Britain, have been moving for some time with the HBNs mentioned above. Following the study carried out and the implementation of the projects, it may be of interest, as a development of the research, to conduct a post-occupancy evaluation that analyses and validates the process and modular design strategies adopted.

Acknowledgements

The contribution is the result of the joint work of the Authors. However, the introductory paragraph and ‘Methodology and operational phases of the research’ must be attributed to R. Pollo; ‘Community houses’ and ‘Literature analysis and case studies’ to E. Biolchini; ‘Exigency anal-

ysis and requirements identification’ to R. Pollo, E. Biolchini and V. Scognamiglio; ‘Definition of modules’ and ‘Technological and construction aspects’ to R. Pollo; ‘Modular functional schemes’ to R. Pollo and E. Biolchini; ‘Conclusions’ to all the Authors. The graphic representations are attributed to V. Scognamiglio; R. Pollo performed scientific supervision.

Notes

1) The research ‘Innovative Model for the Construction of the New Community Houses of ASL TO5 Piemonte – Scientific and Technical Support to ASL TO5’ was conducted for a Local Health Authority in Piedmont and funded by Compagnia di San Paolo as part of the support activities to Public

Administrations for the Italian National Recovery and Resilience Plan Community Houses projects (for the contracts between Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio of the Polytechnic of Turin and the various PAs, the Scientific Responsible is Prof. R. Pollo). As part of the technical activities funded by the Compagnia di San Paolo, Prof. Arch. G. Peretti (in particular for the exigency and requirements analysis) and Arch. G. Alifredi were part of the Working Group with the contribution of A. Fasano and CTM – Compagnia Tecnica Monitoraggi Srl. The research was conducted thanks to the Collaborative Agreement between Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio (Head Prof. R. Pollo) and Istituto di Ricerche Economico-Sociali Piemonte (Head Dr G. Perino).

2) In Annex 1 – ‘Experimentation of the care model Health Homes’ of the Italian Ministry of Health Decree of July 10, 2007, the Health Home is defined as a multi-purpose structure capable of delivering in the same physical space the set of social-health services, promoting, through the spatial contiguity of services and operators, the unity and integration of the essential levels of social-health services, must represent the reference structure for the delivery of the set of primary care.

References

- AGENAS – Agenzia Nazionale per i Servizi sanitari regionali (2022), *Documento di indirizzo per il metaprogetto della Casa della Comunità*, suppl. alla rivista Monitor 2022. [Online] Available at: agenas.gov.it/images/agenas/monitor/quaderno/pdf/Quaderno_Casa_della_comunita.pdf [Accessed 13 October 2023].
- Bask, A., Lipponen, M., Rajahonka, M. and Tinnilä, M. (2011), “Modularity in Logistics Services – A Business Model and Process View”, in *International Journal of Services and Operations Management*, vol. 10, issue 4, pp. 379-399. [Online] Available at: doi.org/10.1504/IJSOM.2011.043463 [Accessed 13 October 2023].
- Bordignon, M. (2007), “L’analisi delle forze che favoriscono la modularità – Il modello di Schilling e la proposta di un nuovo modello”, in *Economia Aziendale 2000 Web*, n. 4, pp. 9-36. [Online] Available at: riviste.paviauniversitypress.it/index.php/ea/article/view/1321/1443 [Accessed 13 October 2023].
- Brambilla, A. and Maciocco, G. (2022), *Dalle Case della Salute alle Case della Comunità*, Carocci, Roma.
- Brambilla, A. and Maciocco, G. (2016), *Le case della Salute – Innovazione e buone pratiche*, Carocci, Roma.
- Budde, K. S., Friedman, D., Alli, K., Randell, J., Kang, B. and Feuerstein, S. D. (2017), “Integrating behavioral health and primary care in two New Jersey federally qualified Health Centers”, in *Psychiatric Services*, vol. 68, issue 11, pp. 1095-1097. [Online] Available at: doi.org/10.1176/appi.ps.201700240 [Accessed 30 October 2023].
- Capolongo, S. (2012), *Architecture for flexibility in health-care*, FrancoAngeli, Milano.
- Capolongo, S., Cocina, G. G., Gola, M., Peretti, G. and Pollo, R. (2019), “Orizzontalità e verticalità nelle architetture per la salute | Horizontality and verticality in architectures for health”, in *Technè | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 17, pp. 152-160. [Online] Available at: oaj.fupress.net/index.php/technè/article/view/5052/5052 [Accessed 13 October 2023].
- Carrara, G., Dubini, N. T., Ferrante, T., Ingaglio, M., Mauri, M., Meoli, F., Palumbo, R., Peretti, G., Pollo, R., Ravagnani Morosini, R., Scorziello, R. and Vitali, M. (2017a), *Architettura dell’Ospedale – Parte I – Aspetti generali e metodologia*, CNETO.
- Carrara, G., Dubini, N. T., Ferrante, T., Ingaglio, M., Mauri, M., Meoli, F., Palumbo, R., Peretti, G., Pollo, R., Ravagnani Morosini, R., Scorziello, R. and Vitali, M. (2017b), *Architettura dell’Ospedale – Parte II – Casi Studio*, CNETO.
- Chen, L.-K., Yuan, R.-P., Ji, X.-J., Lu, X.-Y., Xiao, J., Tao, J.-B., Kang, X., Li, X., He, Z.-H., Quan, S. and Jiang, L.-Z. (2021), “Modular composite building in urgent emergency engineering projects – A case study of accelerated design and construction of Wuhan Thunder God Mountain/Leishenshan hospital to Covid-19 pandemic”, in *Automation in Construction*, vol. 124, article 103555, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103555 [Accessed 30 October 2023].
- Cocina, G. G., Peretti, G., Pollo, R. and Thiebaut, F. (2019), “Nuove tecnologie e progetto – Strumenti innovativi per il co-design”, in Lauria, M., Mussinelli, E. and Tucci, F. (eds), *La Produzione del Progetto*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, pp. 305-311.
- Del Nord, R., Marino, D. and Peretti, G. (2015), “L’umanizzazione degli spazi di cura – Una ricerca svolta per il Ministero della Salute | Humanization of care spaces – A research developed for the Italian Ministry of Health”, in *Technè | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 9, pp. 224-229. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Technè-16127 [Accessed 30 October 2023].
- Department of Health (2013), *Health Building Note 11-01 – Facilities for primary and community care services*. [Online] Available at: england.nhs.uk/wp-content/uploads/2021/05/HBN_11-01_Final.pdf [Accessed 13 October 2023].
- European Parliament (2020), *Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088 (Text with EEA relevance)*, document 32020R0852. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32020R0852 [Accessed 13 October 2023].
- Ferdous, W., Bai, Y., Ngo, T. D., Manalo, A. and Mendis, P. (2019), “New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review”, in *Engineering Structures*, vol. 183, pp. 883-893. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.061 [Accessed 13 October 2023].
- Fifield, L. J., Lomas, K. J., Giridharan, R. and Allinson, D. (2018), “Hospital wards and modular construction – Summertime overheating and energy efficiency”, in *Building and Environment*, vol. 141, pp. 28-44. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.041 [Accessed 30 October 2023].
- Goh, M. and Goh, Y. M. (2019), “Lean production theory-based simulation of modular construction processes”, in *Automation in Construction*, vol. 101, pp. 227-244. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2018.12.017 [Accessed 30 October 2023].
- Herzog, L. and Herzog, T. (2020), “Su flessibilità e sostenibilità del progetto – Riflessioni personali e prospettive | On flexible and green design – Perspectives and personal reflections”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 20-31. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/822020 [Accessed 30 October 2023].
- Hoa, N. T., Tãm, N. M., Derese, A., Markuns, J. F. and Peersman, W. (2019), “Patient experiences of primary care quality amongst different types of health care facilities in central Vietnam”, in *BMC Health Services Research*, vol. 19, article 275, issue 1, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s12913-019-4089-y [Accessed 30 October 2023].
- Langlois, A. (2002), “Modularity in technology and organisation”, in *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 49, issue 1, pp. 19-37. [Online] Available at: [doi.org/10.1016/S0167-2681\(02\)00056-2](https://doi.org/10.1016/S0167-2681(02)00056-2) [Accessed 13 October 2023].
- Lawson, M., Ogden, R. and Goodier, C. (2014), *Design in modular construction*, CRC Press. [Online] Available at: doi.org/10.1201/b16607 [Accessed 30 October 2023].
- Longo, F. and Barsanti, S. (2021), *Community building – Logiche e strumenti di management – Comunità, reti sociali e salute*, EGEA, Milano.
- Mason, T. (2006), *Designed with care – Design and neighbourhood healthcare buildings*, Commission for Architecture and the Built Environment (CABE), London.
- Ministero della Salute (2022a), “Il nuovo modello di assistenza territoriale in un’ottica One Health”, in *PNRR Salute*, 28/04/2022. [Online] Available at: pnrr.salute.gov.it/portale/pnrrsalute/dettaglioContenutiPNRRSalute.jsp?lingua=italiano&id=5828&area=PNRR-Salute&menu=comecambiassn [Accessed 13 October 2023].
- Ministero della Salute (2022b), “Decreto 23 maggio 2022, n. 77 – Regolamento recante la definizione di modelli e standard per lo sviluppo dell’assistenza territoriale nel Servizio sanitario nazionale”, in *Gazzetta Ufficiale*, Serie Generale, n. 144, 22/06/2022. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/06/22/22G00085/sg [Accessed 13 October 2023].
- Obersoler, C. and Sacchetti, L. (2022), *Architetture resilienti per la sanità territoriale – Linee guida per la progettazione – Un nuovo modello di Ospedale di Comunità*, FrancoAngeli, Milano.
- Palumbo, R. (ed.) (1993), *Metaprogettazione per l’edilizia ospedaliera*, Centro Nazionale delle Ricerche, BE-MA Editrice, Milano.
- Perino, G., Sileno, L., Pollo, R., Biolchini, E. and Pejovic, A. (2023), *Nuove visioni per i luoghi della salute – Verso le Case della Comunità – Possibili metamorfosi delle strutture socio-sanitarie territoriali*, IRES – Istituto di Ricerche Economico-Sociali del Piemonte, Torino.
- Rasmussen, S. E. (1964), *Experiencing Architecture*, MIT Press, Boston.
- Rossi Prodi, F. and Stocchetti, A. (1990), *L’Architettura dell’Ospedale*, Alinea, Firenze.
- Sanders, E. B.-N. and Stappers, P. J. (2008), “Co-creation and the new landscapes of design”, in *CoDesign | International Journal of CoCreation in Design and the Arts*, vol. 4, issue 1, pp. 5-18. [Online] Available at: doi.org/10.1080/15710880701875068 [Accessed 13 October 2023].
- Setola, N. (2022), “La forma della Casa della Comunità”, in *Salute Internazionale*, 31/10/2022. [Online] Available at: saluteinternazionale.info/2022/10/la-forma-della-casa-della-comunita/ [Accessed 13 October 2023].
- Steadman, P. (2014), *Building types and built forms*, Matarador, Kibworth Beauchamp, Leicestershire (UK). [Online] Available at: openlibrary.org/books/OL26087952M/Building_Types_And_Built_Forms [Accessed 30 October 2023].
- Terranova, F. (ed.) (2005), *Edilizia per la Sanità*, UTET, Milano.
- Ulrich, R. S., Zimring, C., Quan, X., Joseph, A. and Choudhary, R. (2004), *The role of the physical environment in the hospital of the 21st century – A Once-in-a-lifetime Opportunity*, The Center for Health Design. [Online] Available at: healthdesign.org/chd/research/role-physical-environment-hospital-21st-century [Accessed 13 October 2023].
- Verde, P. (1985), *Le strutture di distretto, distretto potenziato e poliambulatorio – Risultanze del progetto pilota regionale*, Regione Piemonte.
- Verde, P. (1984), *Manuale di edilizia sanitaria – Progettazione di strutture di base, poliambulatori, ospedali*, Carocci, Roma.
- Wagenaar, C., Mens, N., Manja, G., Niemeijer, C. and Guthknecht, T. (2018), *Hospitals – A Design Manual*, Birkhauser, Basel.

ARTICLE INFO

Received 10 September 2023
Revised 08 October 2023
Accepted 19 October 2023
Published 31 December 2023

MODULARITÀ E PERSONALIZZAZIONE PER LE CURE DOMICILIARI

Configurazione e analisi multicriteri degli arredi

MODULARITY AND CUSTOMISATION FOR HOME CARE

Configuration and multicriteria analysis of furnishings

Teresa Villani, Federica Romagnoli

ABSTRACT

Dato l'invecchiamento della popolazione e il crescente interesse verso la verifica preventiva della compatibilità delle abitazioni esistenti ad accogliere attività di cura a domicilio, il contributo riporta i risultati di una ricerca finalizzata a implementare strumenti di supporto al progetto di adeguamento degli alloggi in previsione di una flessibilità che accompagni l'evoluzione delle esigenze degli anziani assistiti. A partire dalla definizione di requisiti connotanti lo spazio domestico per l'assistenza domiciliare, è stato strutturato un sistema di valutazione utile a selezionare e verificare, su base prestazionale, la rispondenza di arredi disponibili sul mercato anche in relazione alla modularità e alla predisposizione alla personalizzazione. Le soluzioni di arredo più performanti sono state inserite in un database che, in futuri sviluppi della ricerca, sarà reso interoperabile in ambiente BIM.

Given the ageing population and the growing interest in prior verification of the compatibility of existing housing to accommodate home care activities, this paper reports the results of a research aimed at implementing tools to support the design of housing adaptation in anticipation of flexibility to accompany the evolving needs of the elderly cared for. An evaluation system was structured starting with the definition of requirements connoting the home space for home care, which was useful for selecting and verifying, on a performance basis, the compliance of furniture available on the market, also in relation to modularity and readiness for customisation. The best-performing furniture solutions were entered into a database that will be made interoperable in future research developments in a BIM environment.

KEYWORDS

assistenza domiciliare, arredi, modularità e personalizzazione, analisi multicriteri, BIM

home care, furnishings, modularity and customisation, multicriteria analysis, BIM

Teresa Villani, Architect and PhD, is an Associate Professor of Architecture Technology at the Department of Planning Design Architecture Technology of 'Sapienza' University of Rome (Italy). She carries out research activities mainly in the field of building quality control through methods of detection and performance evaluation of technological components of buildings and tools for technical design control. E-mail: teresa.villani@uniroma1.it

Federica Romagnoli, Architect and PhD, is a Researcher at the Department of Planning Design Technology of Architecture of 'Sapienza' University of Rome (Italy). She carries out research activities that include the area of BIM-based methodologies to implement multi-criteria assessments and inform decision-making by supporting technical choices on a performance basis, aimed at identifying the best-performing intervention alternatives from a sustainability perspective. E-mail: federica.romagnoli@uniroma1.it



Il costante aumento della popolazione anziana e della relativa domanda di salute rende necessario studiare alloggi 'in divenire', capaci di evolversi in base alle necessità dei fruitori caratterizzati da una fase di transizione dinamica verso la perdita progressiva di autosufficienza, contemplando spazi, arredi e dotazioni tecnologiche adatti a supportare diversi livelli di autonomia e compatibili con l'assistenza domiciliare (Genet et alii, 2011; Magarò and Baratta, 2019; Mangiatori, 2020), nodo essenziale della rete dei servizi sanitari territoriali, la cui riforma rappresenta una milestone della Missione 6 del PNRR (Governo Italiano, 2021).

L'adozione di strategie di cure a lungo termine e il relativo potenziamento del servizio di cure domiciliari integrate pone un insieme di obiettivi di sistema (Investimento 1.2.1 Assistenza Domiciliare, Milestone EU M6C1-4) che coinvolgono attivamente la progettazione dello spazio domestico tra cui:

- incrementare il numero di pazienti presi in carico a domicilio raggiungendo il 10% degli over 65 rispetto all'attuale 6,2% (Mantoan and Borghini, 2021), aumentando la domanda di interventi di adeguamento del patrimonio abitativo esistente;
- rispondere ai bisogni clinico-assistenziali e psicologici degli assistiti e dei familiari per mitigare gli esiti negativi del vissuto legato a patologie cronico-degenerative, operando anche su arredi, componenti e tecnologie di maggiore impatto psicologico (occultamento delle attrezzature sanitarie e di supporto al movimento, ecc.), considerato il lungo tempo che trascorrono nell'abitazione;
- ridurre il tasso di ospedalizzazione e di istituzionalizzazione, assicurando a domicilio la continuità assistenziale, integrando le soluzioni spaziali con sistemi digitali di telemedicina e telemonitoraggio;
- sostenere le persone nel proprio contesto di vita, migliorando l'uso di risorse e servizi, che si concretizza anche nell'adattabilità di ambienti, arredi e attrezzature per garantire spazi di movimento adeguati, nella possibilità di inserire arredi speciali, supporti alla deambulazione e dotazioni tecnologiche (per il controllo ambientale, rilevazione di cadute, ecc.) mantenendo il più possibile inalterata l'immagine della propria abitazione.

L'intento, allineato a livello internazionale, è quello di supportare l'invecchiamento dell'anziano nella propria abitazione (EEG, 2022) e, parallelamente, ridurre il dispendio di risorse connesse alla lungodegenza presso strutture istituzionali (WEF, 2020). Anche la World Health Organization (WHO, 2020) con la UN Decade of Healthy Ageing 2021-2030 promuove ambienti di vita inclusivi e di supporto per la popolazione anziana e per garantire servizi di cura a lungo termine di qualità, integrati e incentrati sulla persona. Per questo occorre rivalutare lo spazio domestico in termini di idoneità ad accogliere, oltre che tutte le attività quotidiane, anche quelle assistenziali e sanitarie, tenendo ben presente che, secondo il modello bio-psico-sociale ICF (WHO, 2001), l'ambiente fisico – attraverso le caratteristiche spaziali, tecnologiche, materiche e mediante l'uso di arredi protesici in grado di compensare eventuali limitazioni funzionali – svolge un ruolo attivo sulla qualità della vita delle persone, incidendo sul benessere degli assistiti e di chi li assiste e facilitando lo svolgimento delle attività di cura.

Verificare anticipatamente la compatibilità degli alloggi esistenti ad accogliere interventi di adat-

tamento della configurazione spaziale e distributiva e dell'integrazione con arredi / attrezzature modulari e allo stesso tempo personalizzabili in funzione dei percorsi specifici di assistenza implica la necessità di trovare una connessione tra il tema dell'Home Modification (Sheth and Cogle, 2023) e quello della progettazione finalizzata all'Ageing in Place (Pani-Harreman et alii, 2021) elaborando strumenti operativi per intervenire 'tempestivamente' sulle necessità di adattare le abitazioni, tenendo conto dell'opportunità d'uso di arredi modulari.

Gli arredi, oltre ad essere parte essenziale del modello ergonomico utente-attezzatura-spazio (Lawton and Nahemow, 1973), che incide fortemente sul corretto svolgimento delle attività, nel caso di adattamento domestico rappresentano la componente più facilmente modificabile, poiché non prevede (o minimizza) trasformazioni edilizie. La modularità e la possibilità di personalizzazione delle soluzioni di arredo e dei componenti all'interno delle abitazioni sono aspetti fondamentali per rispondere alle specifiche e mutevoli esigenze degli utenti anziani (Merilampi et alii, 2020). Infatti l'uso di moduli o componenti standardizzati, che possono essere combinati o assemblati in vari modi per creare configurazioni diverse, consente una certa flessibilità nell'adattare lo spazio alle esigenze specifiche anche in situazioni caratterizzate da vincoli (strutturali, impiantistici, storico-paesaggistici, ecc.) e risulta particolarmente efficace in spazi multifunzionali come quelli per l'assistenza, facilitando un'organizzazione spaziale ottimizzata e orientata all'utente.

Sulla base di tali considerazioni, il contributo riporta i risultati di una ricerca finanziata dall'Ateneo 'Sapienza'¹ e sviluppata con l'obiettivo di implementare strumenti progettuali per supportare l'individuazione di soluzioni tecniche di arredi disponibili sul mercato basate sulla rispondenza a requisiti connotanti le cure domiciliari, appositamente definiti in base agli studi condotti. Nello specifico, il contributo descrive la metodologia adottata per strutturare un framework di valutazione multicriteri basato sulla tecnica AHP Analytic Hierarchy Process (Saaty, 1980) utile alla selezione di arredi age-friendly e care-friendly, secondo un approccio life-span (Giunco, 2014) che considera l'intero corso della vita delle persone e la mutevolezza delle loro esigenze.

I criteri di scelta hanno incluso la modularità degli arredi, la versatilità e la propensione alla personalizzazione mediante l'integrazione / sostituzione dei componenti, nonché l'impiego di materiali naturali, atossici e riciclabili, con la possibilità di sostituire parti degli stessi per aumentarne le potenzialità prestazionali e di riutilizzo. Il framework di valutazione è stato utilizzato per selezionare soluzioni attraverso un'indagine di mercato tra le aziende produttrici di arredi pensati sia per la residenzialità assistita con possibili integrazioni di dispositivi smart (Ambient Assisted Living) sia per ambienti domestici, con l'obiettivo di realizzare un database potenzialmente implementabile in ambiente BIM.

Studi internazionali di riferimento | Nonostante sia riconosciuta l'urgenza di adeguare il patrimonio residenziale alle esigenze della popolazione anziana non autosufficiente, ad oggi sono ancora pochi gli studi utili a definire compiutamente le ca-

ratteristiche ottimali di arredi connotanti lo spazio domestico per le cure domiciliari. Per tale motivo, nell'ambito della ricerca, è stata condotta una sistematizzazione delle informazioni disponibili in letteratura, estesa ad ambiti di studio affini. Inserendo all'interno delle banche dati Google Scholar, PubMed e nell'archivio online dell'Organizzazione The Center for Health Design le parole chiave 'age friendly furniture', 'age-friendly housing', 'home care furniture', 'elderly' AND 'furniture' e facendo riferimento agli articoli pubblicati tra il 2010 e il 2022 in italiano e in inglese, sono state analizzate 41 pubblicazioni.

A seguito della lettura del titolo e dell'abstract, per delimitare l'ambito, sono state selezionate 10 pubblicazioni e aggiunte, attraverso le citazioni ritenute di interesse, ulteriori 7 pubblicazioni utili a individuare criteri progettuali per l'arredabilità degli spazi per l'home care. Il risultato dell'organizzazione delle informazioni raccolte mediante tavole di estrazione dei dati ha compreso:

- studi disponibili sulle caratteristiche di arredi rivolti agli anziani, quali sedute (Blackler et alii, 2018; Fabisiak et alii, 2021), armadi (Zhang and Hj. Shanat, 2023; Shi and Zhang, 2023), letti (Zhan Lyu and Chen, 2018; Su and Fu, 2022), elementi di sostegno (Lipovac et alii, 2022);
- studi che hanno messo in luce i fattori abilitanti propri dello spazio fisico per lo svolgimento delle cure domiciliari (Carnemolla and Bridge, 2018; Piatkowski, Abushousheh and Taylor, 2019; Petersson et alii, 2020);
- linee guida e modelli per la certificazione di abitazioni age-friendly (es. Lifetime Home Criteria, Livable Housing Guidelines, Homes4Life, ecc.);
- indicazioni progettuali per la selezione di arredi nelle strutture residenziali istituzionali (Chambers and Bowman, 2011; Malone and Dellinger, 2011; Jonsson et alii, 2014; Wang, Shi and Niu, 2021).

Da tale ricognizione emerge come gli arredi age-friendly e care-friendly debbano garantire la sicurezza degli assistiti e l'incolumità degli operatori ed essere, pertanto, privi di spigoli vivi che possano costituire un pericolo in caso di urto, ma anche essere composti e rivestiti da materiali che non emettano VOC o altri inquinanti, con bassa reazione al fuoco e che, nel caso di combustione, non sviluppino fumi tossici. La più elevata vulnerabilità dell'anziano a contrarre infezioni richiede inoltre che gli arredi siano facilmente pulibili e igienizzabili. È altrettanto importante che gli arredi (soprattutto nel caso di quelli con superficie molto estesa, come armadi o testiere del letto) siano rivestiti con materiali dalle caratteristiche fotometriche tali da massimizzare la luce naturale quale importante supporto al ciclo circadiano e alle attività di assistenza e da non interferire con la valutazione del colore dell'incarnato dell'assistito.

Per garantire un adeguato livello di comfort acustico e benessere tattile è inoltre auspicabile che, laddove l'assistito trascorre la maggior parte del tempo, gli arredi siano composti da materiali fonoassorbenti e con caratteristiche di piacevolezza al tatto. A livello psicologico è importante che gli arredi, pur se idonei ad essere utilizzati nelle attività di cura, mantengano un aspetto domestico, privilegiando materiali di rivestimento dall'aspetto naturale e privi di elementi stigmatizzanti che rimandino a un uso dedicato a persone con disabilità o dall'aspetto istituzionale. Per quanto riguarda la funzionalità dello spazio, è necessario



Fig. 1 | Alternative configurations achievable with modular FAB system cabinets (credit: J. L. Brown, 2016).

Fig. 2 | Laneway House and Garden Loft GL380 Studio prototypes: container modules for medical devices (credit: Garden Loft, 2023).

che gli arredi siano disposti in modo tale da non ostacolare i movimenti e gli spostamenti degli utenti. Pertanto, risulta vantaggioso poter disporre di arredi versatili, ovvero utilizzabili per più finalità, flessibili in termini di facile amovibilità e, allo stesso tempo, nel caso in cui possano essere utilizzati come elementi di appoggio dall'utente, essere stabili e dotati di sistemi di bloccaggio. Inoltre, le rinnovate istanze di sostenibilità impongono l'impiego di prodotti ecosostenibili in un'ottica life-cycle e, di conseguenza, durevoli, facilmente manutenibili e riciclabili, con la possibilità di sostituire parti degli stessi per garantire il riutilizzo. Anche la potenzialità di integrare gli arredi con tecnologie ICT per l' Ambient Assisted Living concorrerebbe a facilitare molti dei compiti assistenziali, come il monitoraggio delle condizioni di salute degli assistiti e il controllo dei fattori ambientali all'interno dello spazio domestico (Mangiatordi, 2020).

Sia per risparmiare risorse sia per rispondere alla mutevolezza e all'imprevedibilità che caratterizza il complesso quadro esigenziale della popolazione anziana spesso causato dalla perdita progressiva di autonomia, risulta prioritario porre attenzione alla selezione di prodotti realizzati secondo un approccio costruttivo modulare, proprio per configurare lo spazio in modo adattivo alle molteplici necessità, comprese quelle legate alle attività assistenziali. Per tale motivo, un'ulteriore indagine è stata rivolta a casi studio e buone pratiche di abitazioni e alloggi per anziani focalizzati su progettazione modulare, flessibilità e caratteristiche degli arredi che facilitano la realizzazione di spazi più fruibili e sicuri, come il Garden Loft a Calgary, in Canada, e il Borgo Mazzini Smart Co-Housing a Treviso, in Italia. Il caso studio Garden Loft riguarda un'abitazione prefabbricata appositamente studiata per ospitare un utente anziano permettendogli di trasferirsi nei pressi della residenza di un familiare. L'abitazione rappresenta un'evoluzione del sistema Future Adaptive Building System² dove la progettazione degli spazi interni e degli arredi è concepita per adattarsi alle capacità residue degli abitanti sfruttando una serie di componenti modulari prefabbricati (mobili e pensili della cucina e del bagno; librerie, armadi, ecc.) che sostituiscono le tradizionali partizioni e che possono essere facilmente riorganizzati per personalizzare e modificare nel tempo la configurazione degli ambienti (Fig. 1; Brown, 2018).

I contenitori modulari consentono inoltre di nascondere eventuali dispositivi medici che possono essere posizionati in modo discreto attraverso un sistema plug-and-play all'interno delle armadiature o della testiera del letto (Fig. 2), mentre altri elementi di arredo possono essere facilmente integrati con barre di sostegno e dispositivi LED attivati da sensori di movimento (Fig. 3). Gli arredi sono caratterizzati da componenti standardizzati e intercambiabili che permettono un'ampia varietà di configurazioni e sono integrati con i rivestimenti di pareti, con elementi di controsoffittatura o con pareti attrezzate che mimetizzano sistemi impiantistici e dispositivi medici.

Il secondo caso studio, relativo al progetto Borgo Mazzini Smart Co-Housing, ha previsto la riqualificazione di un edificio storico per la realizzazione di alloggi per anziani dotati di arredi che soddisfano i criteri dell'Universal Design, privilegiando soluzioni modulari con possibilità di personalizzazione da parte dei residenti (Fig. 4; Uliana and Mosconi, 2018).

Sebbene entrambi i casi di studio rappresentino esempi virtuosi, in linea con gli obiettivi e l'approccio progettuale rispondente alle esigenze dell'anziano assistito e pur riconoscendo l'efficacia delle soluzioni adottate, gli stessi potrebbero risultare di difficile trasferibilità in quanto nel primo caso si tratta di sperimentazioni più appropriate a interventi di nuova edificazione / ampliamento, mentre nel secondo la scelta dei moduli è stata attentamente considerata in base al contesto di riferimento. La replicabilità delle soluzioni osservate comporterebbe pertanto una congruenza degli assunti di partenza (esigenze degli utenti; percorsi assistenziali specifici; caratteristiche tecniche degli spazi per le cure; ecc.) che difficilmente si verifica. Tali casi di studio hanno permesso quindi non tanto di apprezzare le soluzioni di arredo specifiche, quanto piuttosto di individuare i criteri progettuali seguiti per la realizzazione di abitazioni in grado di rispondere alle esigenze degli anziani e delle persone che prestano assistenza.

Ciò che emerge dalla ricognizione bibliografica e dall'osservazione dei casi studio è che i molteplici ed eterogenei requisiti che gli arredi devono soddisfare rendono spesso complessa in fase progettuale l'individuazione di un'unica soluzione ottimale. Tale complessità rende opportuno l'impiego di strumenti operativi specifici, utili alla se-

lezione di arredi per le cure domiciliari a uso dei progettisti e dei decisori coinvolti sia nel caso di nuove realizzazioni che di adattamento domestico per l'aging in place.

Tra gli strumenti utili a tale scopo Malone e Dellinger (2011) propongono una checklist per selezionare arredi all'interno di strutture sanitarie, che consente di verificare, per ogni arredo, la rispondenza a una serie di requisiti. Tuttavia lo strumento, non contemplando l'assegnazione di un punteggio che esprima il grado di soddisfacimento dell'arredo all'insieme dei requisiti, risulta meno efficace nel confronto tra soluzioni alternative che rispondono allo stesso numero di item.

Più appropriata a tale finalità risulta l'adozione di tecniche di analisi multicriteri, tra le quali la AHP è quella che trova maggiore applicabilità in ambito architettonico grazie al suo carattere speditivo e alla flessibilità ed espandibilità del sistema di valutazione (Ogrodnik, 2019): essa infatti consente di confrontare e classificare diverse alternative attraverso la scomposizione di un obiettivo generale in una serie di criteri (di natura quantitativa e qualitativa) gerarchizzati secondo livelli di priorità definiti dal decisore.

Diversi sono gli studi che vedono l'applicazione della tecnica di valutazione multicriteri AHP per la progettazione di arredi (Varol, 2023; Liu et alii, 2023) così come per la loro selezione in ambiti differenti da quello oggetto di studio, quale, ad esempio, quello scolastico (Salomon, Alonso and Silva Marins, 2016; Khoshabi et alii, 2020). Tuttavia, ad oggi, non esiste ancora uno strumento appositamente dedicato alla valutazione e selezione di arredi per l'home care. Pertanto le successive sezioni del contributo descrivono i passaggi metodologici seguiti per la costruzione del framework di un nuovo strumento di valutazione multicriteri pensato per essere utilizzato in fase di selezione di arredi per la progettazione di ambienti idonei ad accogliere attività di assistenza a domicilio.

Metodologia e fasi della ricerca | Il contributo ripercorre l'approccio metodologico proprio della cultura tecnologica del progetto adottato nella ricerca, che considera l'adattabilità dell'alloggio in relazione allo studio dei modelli d'uso assistenziali per riconfigurare lo spazio con arredi modulari, personalizzabili e multifunzionali, tenendo a riferimento i principi di Universal Design. La metodolo-

gia adottata nella ricerca ha previsto 4 fasi (Fig. 5).

Nella prima fase, in linea con l'approccio esigenziale-prestazionale, è stata attuata una ricognizione e sistematizzazione delle informazioni reperite da uno studio bibliografico relativo alle caratteristiche ottimali (requisiti tecnologici) degli arredi dedicati alla popolazione anziana bisognosa di assistenza e dallo studio condotto sul campo mediante interviste a caregiver e personale di assistenza per acquisire una comprensione più approfondita delle attività legate all'home care.

A seguito di tale ricognizione, la seconda fase è stata volta alla strutturazione dello strumento di valutazione multicriteri, facendo riferimento alla tecnica AHP che consente di assegnare un punteggio a diverse alternative (in questo caso arredi) espresso dalla sommatoria pesata del numero (e del grado) di criteri soddisfatti, attraverso i seguenti passaggi: 1) definizione dei criteri, dei sub-criteri di valutazione e dei relativi indicatori di successo; 2) attribuzione dei pesi a ciascun criterio e sub-criterio; 3) implementazione dello strumento di valutazione multicriteri in fogli di calcolo all'interno del software Microsoft Excel.

Al fine di definire i criteri e sub-criteri di valutazione i requisiti tecnologici individuati nella prima fase sono stati organizzati all'interno di 7 categorie facendo riferimento alle classi di requisiti della UNI 8289, ovvero: sicurezza (d'uso e al fuoco), benessere (visivo, olfattivo e di qualità delle emissioni, tattile), fruibilità (usabilità e flessibilità d'uso), aspetto (carattere di domesticità e caratteri sensoriali / percettivi, tessiture, cromie), gestione (manutenibilità, pulibilità, durabilità, riparabilità, sostituibilità) integrabilità impiantistica e salvaguardia dell'ambiente (sostenibilità della produzione e riciclabilità delle componenti). A queste è stata aggiunta un'ottava categoria relativa alla modularità / personalizzazione, fondamentale per individuare le soluzioni di arredo più efficaci nell'ambito delle cure domiciliari conseguenti alle esigenze mutevoli e difficilmente prevedibili degli utenti.

Rispetto alle caratteristiche inerenti la modularità, la ricerca si è concentrata sulla selezione di prodotti caratterizzati da requisiti di separabilità (grado di smontabilità e ricombinazione del prodotto in una nuova configurazione senza perdere funzionalità), specificità (capacità di un componente di avere una chiara, unica e definita funzione con le sue interfacce nel sistema-prodotto), trasferibilità (grado di riutilizzabilità dei componenti di un sistema-prodotto all'interno di un altro sistema). In merito alla personalizzazione è stata considerata la disponibilità di un prodotto in diverse opzioni di finitura per materiale, cromie e texture.

Per ogni sub-criterio di valutazione è stato quindi definito uno specifico indicatore in grado di esprimere, sia per aspetti quantitativi che qualitativi, il livello di soddisfacimento da parte degli arredi dei requisiti considerati attraverso una scala di valori discreti, rappresentata dai punteggi 0 (requisito non soddisfatto); 0,5 (requisito parzialmente soddisfatto) e 1 (requisito pienamente soddisfatto).

L'elenco delle 8 categorie di criteri, dei 20 sub-criteri e dei relativi indicatori sono rappresentati nella Tabella 1. L'assegnazione dei pesi per le categorie e per i sub-criteri è stata attuata mediante confronto a coppie, facendo riferimento alla scala di valori proposta da Saaty (2008), riportata nella Tabella 2. Per l'insieme delle 8 categorie e per ciascuna di esse è stata quindi predisposta una ma-

trice simmetrica che illustra l'importanza relativa di ogni criterio rispetto agli altri (Tabb. 3-10). Il calcolo dei pesi dei criteri, normalizzati tra 0 e 1, è stato ottenuto attraverso la sommatoria dei termini di ogni riga, divisa per la somma di tutti i termini della matrice (Al-Saggaf et alii, 2020). Il punteggio finale (compreso tra 0 e 1) attribuito a un arredo sarà quindi ottenuto dalla sommatoria pesata dei punteggi parziali di ogni categoria di criteri, a loro volta espressi dalle sommatorie pesate dei punteggi parziali relativi ad ogni sub-criterio.

Una volta predisposto lo strumento di valutazione, la terza fase della ricerca è stata dedicata a un'indagine di mercato – eseguita online facendo riferimento ai siti web di aziende produttrici di arredi accreditate presso importanti eventi ed esposizioni nazionali e internazionali – finalizzata alla condivisione di conoscenza, di innovazioni e best practice nel campo della salute e del benessere della popolazione anziana (es. Exposanità, AgeingFit), attraverso cui sono state individuate le prime 7 aziende (comprese quelle specializzate

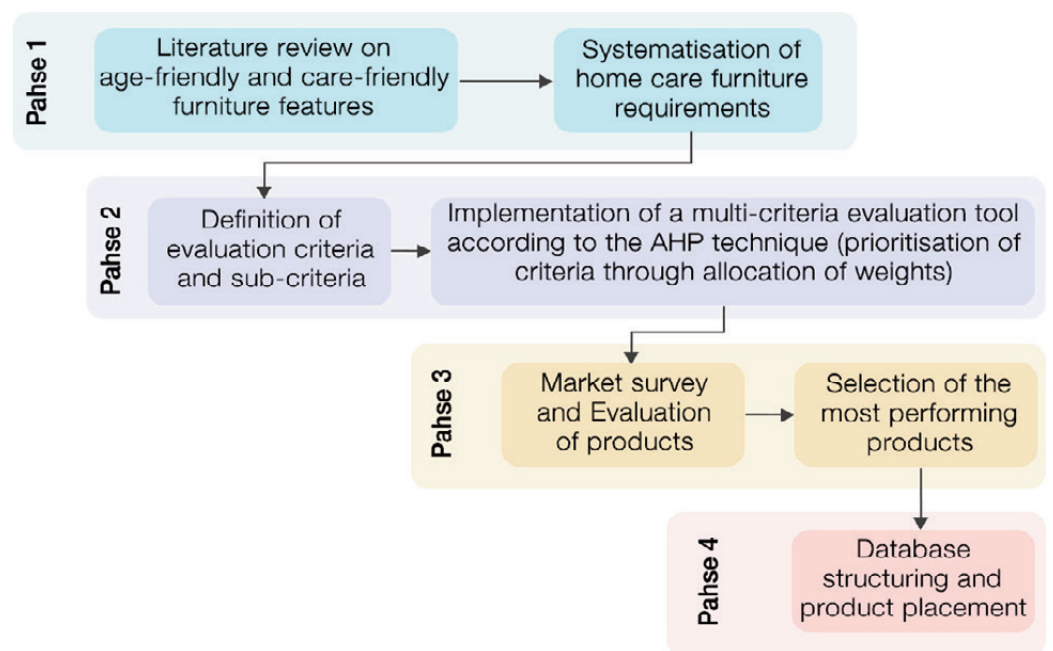
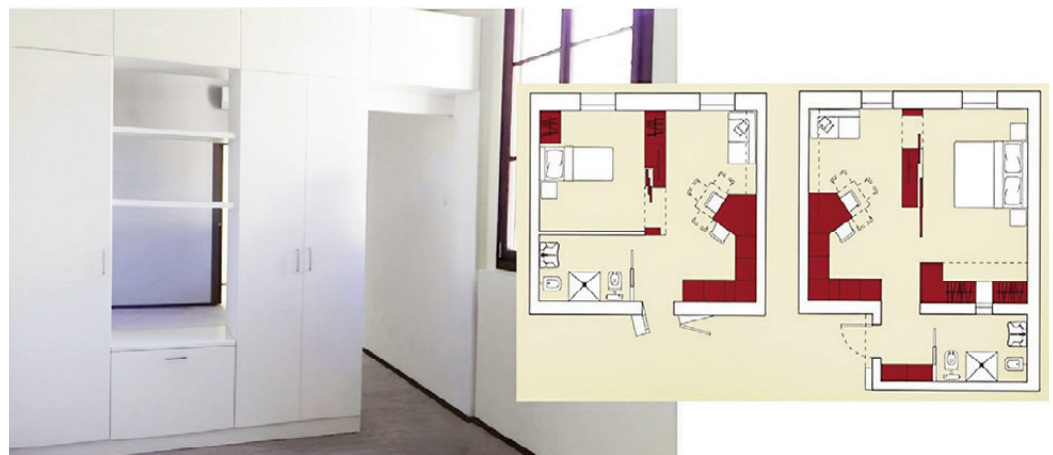


Fig. 3 | Age-friendly modular furniture in the Garden Loft GL480 housing unit (credit: Garden Loft, 2023).

Fig. 4 | Modular furniture in the elderly housing of the Borgo Mazzini Smart Co-Housing project in Treviso (credit: I.S.R.A.A., 2018).

Fig. 5 | Outline of the research methodology (credit: the Authors, 2023).

Criteria Categories	Sub-criteria	Marker	Low Score (0)	Medium Score (0.5)	High Score (1)
1. Safety	1a. Low reaction to fire	reaction to fire	highly flammable	/	incobustible
	1b. Rounded edges	presence / absence of sharp edges	presence of sharp edges	absence of sharp edges in the parts most exposed to impact	absence of sharp edges
	1c. Stability	possibility to hold on to	not stable	stable but with no elements to hold on to	stable with elements to hold on to
	1d. Low VOC emission	VOC certificate	high emission	/	low emission
2. Comfort	2a. Sound absorption	sound absorption coefficient	<0.4	0.4-0.8	>0.8
	2b. Pleasant to touch (low thermal conductivity)	thermal conductivity (W/mK)	>1	0.1-1.0	<0.1
3. Usability / Flexibility	3a. Easy to move	removability	fixed	not fixed but heavy or not easy to move	easy to move
	3b. Versatility	no. of different use	only one use	/	more than one use
	3c. Affordance / user-friendliness	age-friendliness	non-compliant with Universal Design features	/	compliant with Universal Design features
4. Appearance	4a. Natural appearance	natural (or apparently natural) finishing materials	/	/	natural finishing material
	4b. Home look	presence of stigmatising elements	hospital appearance or referring to persons with disabilities	/	domestic appearance / non-stigmatising aesthetics
5. Management	5a. Easy to clean	water-resistance / low porosity	difficult to clean	/	easy to clean
	5b. Resistance to scratches and wear	hardness	prone to wear	medium resistant	hard
6. Integrability	6a. Integrability with smart / IoT systems	connection to home automation system	cannot be equipped with home automation system	can be equipped with home automation system	already equipped with home automation system
7. Environmental Protection	7a. Sustainable manufacturing	LCA certification	without certification	with certification	with EPD certification
	7b. Recyclability	recyclability certification	without certification	/	with certification
8. Modularity / Customisation	8a. Separability	separability of components	non-separable	partially separable	separable
	8b. Transferability	transferability of components in another object	non-transferable	/	transferable
	8c. Specificity	clear and defined function of the components	components with no specific function	/	components with specific function
	8d. Possibility of customisation	available in different colours / textures / materials	/	available in different colours	available in different colours / textures / materials

Tab. 1 | List of criteria categories, sub-criteria, markers and score ranges (credit: the Authors, 2023).

in arredi dedicati alle strutture residenziali sanitarie e sociosanitarie) e, utilizzando lo strumento di valutazione precedentemente definito, sono stati analizzati i prodotti, selezionando quelli con punteggio maggiore o uguale a una soglia di sufficienza, corrispondente al valore di 0.5.

Tale selezione ha permesso di strutturare, nella quarta fase, un primo repertorio di soluzioni rispondenti (database), potenzialmente ampliabile in futuri sviluppi della ricerca. Il database è stato implementato sotto forma di tabelle in Microsoft Excel, suddividendo i prodotti reperiti dall'indagine di mercato in base alla funzione: letti; sedute; contenitori; tavoli; dispositivi di illuminazione; elementi di separazione mobili. All'interno del database, per ogni prodotto è indicato il produttore, il nome e il codice da catalogo, un'immagine rappresentativa ed il QR code con il link al sito del produttore dove sono state reperite le informazioni tecniche necessarie ad attuare la valutazione multicriteri. Inoltre, per ogni prodotto sono riportati i punteggi relativi ad ogni sub-criterio, i punteggi per categoria e il punteggio complessivo.

Risultati e limiti | Esito principale della ricerca è stata la definizione e implementazione di uno strumento di valutazione multicriteri degli arredi per l'assistenza a domicilio, pensato per essere utilizzato dai progettisti nel caso di adattamento domestico o di nuova progettazione. Lo strumento è composto da un file editabile mediante il software Excel all'interno del quale il valutatore compila una tabella sulla base delle informazioni tecniche relative all'arredo / prodotto che intende valutare (Fig. 6). Ogni valore inserito dal valutatore (0; 0.5 o 1) viene moltiplicato per il sistema di pesatura predefinito, dando luogo a una serie di punteggi parziali che stabiliscono le prestazioni del prodotto suddivise per categoria. Tali punteggi parziali vengono a loro volta moltiplicati per il peso assegnato a ciascuna categoria permettendo di ottenere un punteggio complessivo, associato all'arredo preso in esame.

I risultati parziali relativi a ogni sub-criterio, i risultati suddivisi in base alle 8 categorie e il punteggio finale che esprime il livello di performance dell'arredo (da 0 a 1) sono visualizzabili mediante una coppia di diagrammi polari (o spider chart), come esemplificato in Figura 7.

Il sistema di valutazione proposto consente di basare le decisioni su una più oggettiva misurazione delle prestazioni fornite da un componente di arredo rispetto ai requisiti connotanti le cure domiciliari, permettendo non solo di scartare le soluzioni che non soddisfano una certa soglia di punteggio, ma anche di confrontare più agevolmente quelle risultate maggiormente rispondenti (soluzioni alternative conformi). A titolo esemplificativo, si riportano gli esiti della valutazione relativa a 8 soluzioni alternative di testiere del letto e a 6 comodini (Figg. 8, 9). Nel primo caso il sistema ha permesso di paragonare i prodotti e di identificare quelli che, a parità di prestazioni in termini di sicurezza d'uso, di comfort e funzionalità, si prestassero a una maggior personalizzazione da parte degli utenti in termini di configurazioni e finiture. Nel secondo caso lo strumento ha evidenziato i prodotti dotati di maggiore flessibilità e versatilità nelle possibilità di utilizzo, risultando, anche in questa seconda applicazione, un valido supporto in grado di guidare le scelte del progettista in fase decisionale.

Lo strumento, così concepito, è stato utilizzato per valutare 130 prodotti reperiti da una prima indagine di mercato online (Fig. 10): 85 prodotti hanno ottenuto un punteggio superiore a 0.5 e sono stati inseriti nel database in Excel (Fig. 11) dove, per ogni prodotto, sono state aggiunte una serie di informazioni (dimensioni del prodotto, caratteristiche di installazione, costo, ecc.) utili a rapportare il prodotto alle condizioni di contesto in cui il progettista si troverà ad operare. Tale database costituisce il secondo prodotto della ricerca in quanto rappresenta una prima ricognizione di arredi risultati conformi ai requisiti e quindi più idonei ad essere impiegati all'interno di abitazioni potenzialmente chiamate ad ospitare attività di cure domiciliari.

Tra i principali limiti osservabili vi è il fatto che, ad oggi, lo strumento ha permesso di individuare soluzioni di arredo che, seppure rispondenti ai requisiti prestabiliti, sono state analizzate in modo assoluto, ovvero avulse da uno specifico contesto (alloggio) in cui essere inserite. Pertanto, poiché l'efficacia delle soluzioni tecniche di arredo dipende fortemente dalle relazioni che questi instaurano con lo spazio domestico, soprattutto nel caso in cui l'abitazione sia oggetto di ristrutturazione / rifunzionalizzazione, è indispensabile che il progettista selezioni i prodotti non solo secondo i livelli di performance dell'oggetto in sé, quanto anche rispetto al loro corretto dimensionamento in base allo spazio disponibile, all'armonizzazione o contrasto cromatico tra l'arredo e le superfici, ai vincoli di natura tecnica per la loro installazione, ecc.

Per compensare tale limite l'odierna versione del sistema di valutazione è stata concepita per premiare gli arredi che, oltre ad essere funzionali, ergonomici e sostenibili dal punto di vista ecologico-ambientale, possiedono quelle caratteristiche di modularità e personalizzazione che li rendono maggiormente adattivi a diversi contesti. In futuri step della ricerca saranno pertanto implementate ulteriori categorie e criteri di valutazione utili a verificare la compatibilità degli arredi con le condizioni di contesto specifiche (aspetti tecnici, economici, ecc.) di cui tenere conto in fase di progetto.

Conclusioni e futuri sviluppi | Dallo studio condotto emerge che l'interesse e la recente documentazione operativa prodotta in ambito nazionale ed europeo per l'attuazione delle cure domiciliari si concentra quasi esclusivamente sul tipo di servizio socio-sanitario, sul modello virtuale e sulla gestione della teleassistenza, mentre ad oggi non sono stati definiti i requisiti connotanti di arredi, attrezzature e configurazioni spaziali per organizzare al meglio i luoghi fisici dove fornire le prestazioni socio-sanitarie programmate.

La ricerca descritta nel presente contributo, a partire dalla definizione di criteri utili alla selezione di arredi rispondenti ai requisiti connotanti l'home care, ha previsto lo sviluppo di due strumenti: uno strumento di valutazione multicriteri per la selezione dei prodotti basato su una logica di condivisione e di interscambio di informazioni tecniche provenienti dal mercato, comprese la sicurezza d'uso, funzionalità, modularità, componibilità, adattabilità, attrezzabilità, flessibilità d'uso, manutenibilità, integrabilità con tecnologie smart, ecc., e un database contenente i prodotti risultati essere più idonei ad essere impiegati in spazi in cui vengono attuate attività di assistenza a domicilio.

value	definition
1	the first element is equally important to the second
3	the first element is slightly more important than the second
5	the first element is more important than the second
7	the first element is strongly more important than the second
9	the first element is of the highest possible dominance over the second
2, 4, 6, 8	represent compromise between the definitions listed above

Tab. 2 | Pair-Wise comparison scale (source: Saaty, 2008).

In particolare il contributo ha inteso mostrare come attraverso l'uso di componenti modulari prioritariamente selezionati è possibile ottimizzare il progetto di adattabilità attraverso l'assemblaggio di un sistema-prodotto a cui demandare funzioni supportive e protesiche, personalizzabile in funzione degli specifici percorsi assistivi da attuare a domicilio, anche per incentivare un approccio preventivo secondo cui valutare l'adattabilità dello spazio domestico ad accogliere future modifiche e integrazioni richieste dalle attività di assistenza e cura.

Rispetto a quanto fino ad oggi prodotto nell'ambito della ricerca, oltre all'introduzione di nuove fasi che potranno rendere l'analisi multicriteri più raffinata e consentire di superare alcuni dei limiti precedentemente discussi, ulteriori sviluppi riguarderanno l'implementazione sia del sistema di valutazione multicriteri sia del database di soluzioni di arredo compatibili con l'assistenza a domicilio in ambiente BIM. La finalità è quella di beneficiare dei vantaggi offerti dalla digitalizzazione delle informazioni tecniche che, trasformate in 'oggetti dinamici' connessi alla modellazione degli spazi dell'alloggio, permetteranno una più facile verifica di congruità dei prodotti, consentendo di superare il processo tradizionale di tipo manuale, operato dai progettisti durante la selezione delle soluzioni più appropriate.

L'adattamento degli alloggi affinché diventino più inclusivi e rispondenti alle esigenze degli anziani rappresenta un tema cruciale nell'attuale scenario socio-demografico. Pertanto la definizione di strumenti di supporto rivolti ai progettisti, quali attori in grado di incidere fortemente sulla realizzazione di spazi abitativi più appropriati per la popolazione anziana, può avere importanti implicazioni a livello culturale, in quanto potrebbe stimolare una maggiore sensibilizzazione e consapevolezza verso un approccio progettuale attento alle problematiche connesse all'uso degli spazi da parte di utenti fragili.

Quanto prodotto nell'ambito della ricerca offre una prima risposta in termini di strumenti avanzati di progettazione e simulazione a supporto del pro-

	Safety	Comfort	Usability / Flexibility	Appearance	Management	Integrability	Environmental protection	Modularity / Customisation	Weight
Safety	1.00	5.00	3.00	9.00	7.00	7.00	5.00	7.00	0.27
Comfort	0.20	1.00	5.00	3.00	0.33	7.00	0.33	0.33	0.11
Usability / Flexibility	0.33	0.20	1.00	9.00	3.00	7.00	3.00	5.00	0.18
Appearance	0.11	0.33	0.11	1.00	0.33	7.00	3.00	1.00	0.08
Management	0.14	3.03	3.00	3.00	1.00	9.00	3.00	3.00	0.16
Integrability	0.14	0.14	0.14	0.14	0.11	1.00	0.11	0.11	0.01
Environmental protection	0.20	3.03	0.33	0.33	0.33	9.00	1.00	3.00	0.11
Modularity / Customisation	0.14	3.03	0.20	1.00	0.33	9.00	0.33	1.00	0.09

Safety	1a. Low reaction to fire	1b. Rounded edges	1c. Stability	1c. Stability	Weight
1a. Low reaction to fire	1.00	5.00	0.14	1.00	0.28
1b. Rounded edges	0.20	1.00	0.33	1.00	0.10
1c. Stability	7.00	3.00	1.00	1.00	0.47
1d. Low VOC emission	1.00	1.00	1.00	1.00	0.16

Tab. 3 | Weight calculation for home care suitability criteria (credit: the Authors, 2023).

Tab. 4 | Weight calculation for safety sub-criteria (credit: the Authors, 2023).

Comfort	2a. Sound absorption	2b. Pleasant to touch	Weight	Usability / Flexibility	3a. Easy to move	3b. Versatility	3c. Affordance / user-friendliness	Weight
2a. Sound absorption	1.00	5.00	0.83	3a. Easy to move	1.00	9.00	0.14	0.36
2b. Pleasant to touch	0.20	1.00	0.17	3b. Versatility	0.11	1.00	0.11	0.04
				3c. Affordance / user-friendliness	7.00	9.00	1.00	0.60

Tab. 5 | Weight calculation for comfort sub-criteria (credit: the Authors, 2023).

Tab. 6 | Weight calculation for usability / flexibility sub-criteria (credit: the Authors, 2023).

cesso decisionale di verifica e adattabilità dell'alloggio per le cure domiciliari e potrebbe, dal punto di vista sociale, migliorare significativamente la qualità degli spazi di vita degli assistiti (e di lavoro dei caregiver) garantendo ambienti più sicuri, confortevoli, funzionali e personalizzati. Sotto l'aspetto economico l'approccio preventivo promosso, che privilegia l'utilizzo di arredi modulari, flessibili e integrabili con dispositivi smart, potrebbe inoltre contribuire alla contrazione dei costi connessi alla necessità di onerose modifiche o continui adattamenti delle abitazioni nel tempo, oltre che a favorire una progettazione più consapevole in termini di ricadute sulla sostenibilità ambientale.

Infine la messa a punto di metriche condivise per valutare l'appropriatezza dei prodotti presenti sul mercato rispetto alle esigenze degli anziani, quale segmento di popolazione di maggiore crescita nei prossimi decenni, potrebbe auspicabil-

mente contribuire a incentivare il settore della produzione verso una maggiore diversificazione dell'offerta di arredi adatti alle necessità dell'anziano assistito e che abbiano caratteristiche percettivo-sensoriali più accattivanti in virtù di una più efficace armonizzazione con lo spazio domestico anche in termini di qualità morfologica.

The constant increase in the elderly population and the related demand for health makes it necessary to study 'evolving' housing, capable of adapting to the needs of users characterised by a dynamic transition phase toward the progressive loss of self-sufficiency, contemplating spaces, furnishings and technological equipment suitable to support different levels of autonomy and compatible with home care (Genet et alii, 2011; Magarò and Baratta, 2019;

Mangiatori, 2020), an essential node in the network of territorial health services, the reform of which is a milestone of Mission 6 of the NRRP (Governo Italiano, 2021). The adoption of long-term care strategies and related integrated home care service enhancement poses a set of system goals (Investment 1.2.1 Home Care, EU Milestone M6 C1-4) that actively involve the design of the home space, including:

- increase the number of patients taken care of at home by reaching 10% of the over-65s compared to the current 6.2% (Mantoan and Borghini, 2021), increasing the demand for retrofitting the existing housing stock;
- respond to the clinical welfare and psychological needs of caregivers and family members to mitigate the adverse outcomes of the experience related to chronic-degenerative diseases, also working on furniture, components and technologies of

more significant psychological impact (concealment of health and movement support equipment, etc.), given the long time they spend in the home; – reduce the rate of hospitalisation and institutionalisation by ensuring continuity of care at home by integrating space solutions with digital telemedicine and telemonitoring systems; – support people in their living environment by improving the use of resources and services, which is also embodied in the adaptability of environments, furniture and equipment to ensure adequate movement spaces, the possibility of including special furniture, walking aids and technological equipment (for environmental control, fall detection, etc.) while keeping the image of one’s home as unaltered as possible.

The intent, aligned internationally, is to support the ageing elderly in their own homes (EEG, 2022) and, in parallel, reduce the expenditure of resources related to long-term care in institutional facilities (WEF, 2020). The World Health Organization (WHO, 2020), with the UN Decade of Healthy Aging 2021-2030, also promotes inclusive and supportive living environments for the elderly population and to ensure quality, integrated and person-centred long-term care services. For this, it is necessary to re-evaluate the home space in terms of its suitability to accommodate, in addition to all daily activities, care and health activities, keeping well in mind that, according to the ICF bio-psycho-social model (WHO, 2001), the physical environment – through spatial, technological, material characteristics and through the use of prosthetic furnishings capable of compensating for any functional limitations – plays an active role in people’s quality of life, affecting the well-being of the cared for and their caregivers and facilitating the performance of care activities.

Checking the compatibility of existing housing

in advance to accommodate interventions to adapt the spatial and distributional configuration and integration with modular and, at the same time, customisable furniture / equipment according to specific care pathways implies the need to find a connection between the theme of Home Modification (Sheth and Cogle, 2023) and that of design aimed at Ageing in Place (Pani-Harreman et alii, 2021) by developing operational tools to intervene ‘early’ on the needs to adapt housing, taking into account the opportunity of using modular furniture.

Furniture, in addition to being an essential part of the user / equipment / space ergonomic model (Lawton and Nahemow, 1973), which strongly affects the proper performance of activities, in the case of home adaptation represents the most easily modifiable component, since it does not involve (or minimises) building transformations. Modularity and the possibility of customisation of furniture solutions and components within homes are key aspects in meeting the specific and changing needs of elderly users (Merilampi et alii, 2020). In fact, the use of standardised modules or components, which can be combined or assembled in various ways to create different configurations, allows for flexibility in adapting space to specific needs even in situations characterised by constraints (structural, plant engineering, historical-landscape, etc.) and is particularly effective in multifunctional spaces such as care spaces, facilitating optimised, user-oriented spatial organisation.

Based on these considerations, the contribution reports the results of research funded by the University of ‘Sapienza’¹ and developed to implement design tools to support the identification of technical solutions of furniture available on the market based on compliance with requirements connoting home care, specifically defined based

on the studies conducted. Specifically, the paper describes the methodology adopted to structure a multi-criteria evaluation framework based on the AHP Analytic Hierarchy Process technique (Saaty, 1980) useful for the selection of age-friendly and care-friendly furniture, according to a life-span approach (Giunco, 2014) that considers the entire life course of people and the mutability of their needs.

Selection criteria included modularity of furniture, versatility, and propensity for customisation through integration / replacement of components, as well as the use of natural, non-toxic, and recyclable materials, with the possibility of replacing parts of them to increase their performance and reuse potential. The evaluation framework was used to select solutions through a market survey among manufacturers of furniture designed both for assisted living with possible integration of smart devices (Ambient Assisted Living) and for home environments, aiming to create a database that could be implemented in a BIM environment.

International reference studies | Although the urgency of adapting the residential stock to the needs of the dependent elderly population is acknowledged, there are still few useful studies to fully define the optimal characteristics of furnishings connoting the home space for home care. Therefore, as part of the research, the information available in the literature was systematised and extended to related study outfits. By entering within the databases Google Scholar, PubMed and the online archive of The Center for Health Design Organization the keywords ‘age-friendly furniture’, ‘age-friendly housing’, ‘home care furniture’, ‘elderly’ AND ‘furniture’ and referring to articles published between 2010 and 2022 in Italian and English, 41 publications were analysed.

Appearance	4a. Natural appearance	4b. Home look	Weight
4a. Natural appearance	1.00	0.14	0.13
4b. Home look	7.00	1.00	0.88

Management	5a. Easy to clean	5b. Resistance to scratches and wear	Weight
5a. Easy to clean	1.00	1.00	0.50
5b. Resistance to scratches and wear	1.00	1.00	0.50

Environmental protection	7a. Sustainable manufacturing	7b. Recyclability	Weight
7a. Sustainable manufacturing	1.00	1.00	0.50
7b. Recyclability	1.00	1.00	0.50

Modularity / Customisation	8a. Separability	8b. Transferability	8c. Specificity	8d. Possibility of customisation	Weight
8a. Separability	1.00	5.00	7.00	0.33	0.42
8b. Transferability	0.20	1.00	5.00	0.33	0.21
8c. Specificity	0.14	0.20	1.00	0.33	0.05
8d. Possibility of customisation	3.00	3.00	3.00	1.00	0.32

Tab. 7 | Weight calculation for appearance sub-criteria (credit: the Authors, 2023).

Tab. 8 | Weight calculation for management sub-criteria (credit: the Authors, 2023).

Tab. 9 | Weight calculation for environmental protection sub-criteria (credit: the Authors, 2023).

Tab. 10 | Weight calculation for modularity / customisation sub-criteria (credit: the Authors, 2023).

Technical features from Product Data Sheet

Without edges and parts that could cause trauma. TOP, DRAWER FRONTS AND DOOR are made of shaped MDF covered in non-toxic plastic material which guarantee impermeability to water and odors, mechanical resistance to impacts, wear resistance, ease of cleaning, great durability over time. The plastic-coated MDF ensures easy sanitation. MDF improves the resistance of the hinge attachment to the door. TOP with rounded edges and shaped to contain liquids. Drawer with large single compartment sliding on sturdy and safe steel guides. Customizable door opening (right/left). HINGES: The door features quick assembly hinges with eccentric screw, adjustable in 3 directions. Hinges in pressed and chromed steel, easy to adjust, with 110° opening. HANDLES : Comfortable grip handles, aluminum finish arch (128mm pitch). FRAME AND INTERNAL SHELF: Made with wood particle agglomerate panels (UNI EN 309) th. 18 mm in class E1 with low formaldehyde emission, melamine faced on 2 sides with scratch-resistant finish. Class II^ reaction to fire. (If requested it can be made in fire reaction class I^). Sides and base 18mm thick visible front edge equipped with dustproof and noise-reducing profile. Back made of thick ennobled wood fiber panel. 6 mm. 25mm thick shelves edged with anti-trauma ABS 2mm radiused front profile. Fixing of shelves using shelf supports.

Base of three different types:
 -Bedside table rests at the top on 4 twin wheels with a diameter of 50 mm, two of which at the front with brakes. The wheels are fixed to the body with special steel plates which distribute the forces over a larger area, extending the life of the bedside table.
 -60mm diameter painted steel legs on which adjustable plastic feet are placed. Body height from the ground 150 mm to allow convenient cleaning.
 -aluminum base for the insertion of the servants' table.

OPTIONAL
 Upon request, cylindrical lock with double key available only on the door.
 Upon request, molded base for inserting a serving table
 Upon request, a servant top can be attached to steel studs
 On request towel rack can be attached
 Upon request, internal steel rod bottle holder

Customizable colors from the color table.

Dimension: 460 x 460 x 750 mm.



Images of the product:



Example of correspondence between technical features and evaluated levels of performance

criteria	category	sub-criteria	marker	low score (0)	medium score (0.5)	high score (1)
1. Safety	1a. Low reaction to fire		Reaction to fire	highly flammable	/	incobustible
		1b. Rounded edges	Presence / absence of sharp edges	presence of sharp edges	absence of sharp edges in the parts most exposed to impact	absence of sharp edges
	1c. Stability		Possibility to hold on to	not stable	stable but with no elements to hold on to	stable with elements to hold on to
		1d. Low VOC emission	VOC certificate	high emission	/	low emission
2. Comfort	2a. Sound absorption	Sound absorption coefficient	<0.4	0.4-0.8	>0.8	
	2b. Pleasant to touch (low thermal conductivity)	Thermal conductivity (W/mK)	>1	0.1-1	<0.1	
3. Usability / Flexibility	3a. Easy to move	Removability	fixed	not fixed but heavy or not easy to move	easy to move	
	3b. Versatility	Nr. of different use	only one use	/	more than one use	
	3c. Affordance/ user-friendliness	Age-friendliness	non-compliant with Universal Design features	/	compliant with Universal Design features	
4. Appearance	4a. Natural appearance	Natural (or apparently natural) finishing materials	/	/	natural finishing material	
	4b. Home look	Presence of stigmatising elements	hospital appearance or referring to	/	domestic appearance / non-stigmatising aesthetics	
5. Management	5a. Easy to clean	Water-resistance/ low porosity	difficult to clean	/	easy to clean	
	5b. Resistance to scratches and wear	Hardness	prone to wear	medium resistant	hard	
6. Integrability	6a. Integrability with smart / IoT systems	Connection to home automation system	cannot be equipped with home	can be equipped with home automation system	already equipped with home automation system	
7. Environmental Protection	7a. Sustainable manufacturing	LCA certification	without certification	with certification	with EPD certification	
	7b. Recyclability	Recyclability certification	without certification	/	with certification	
8. Modularity / Customisation	8a. Separability	Separability of components	non-separable	partially separable	separable	
	8b. Transferability	Transferability of components in another object	non-transferable	/	transferable	
	8c. Specificity	Clear and defined function of the components	components with no specific function	/	components with specific function	
	8d. Possibility of customisation	Available in different colours/textures/mat materials	/	available in different colours	Available in different colours, textures and materials	

Fig. 6 | Example of using the evaluation matrix (credit: the Authors, 2023).

Following the reading of the title and abstract, to delimit the scope, 10 publications were selected and added, through the citations deemed of interest, an additional 7 publications useful for identifying design criteria for the furnishability of home care spaces. The result of organising the information collected through data extraction tables included:

- available studies on the characteristics of furnishings aimed at the elderly, such as seating (Blackler et alii, 2018; Fabisiak et alii, 2021), cabinets (Zhang and Hj. Shanat, 2023; Shi and Zhang, 2023), beds (Zhan Lyu and Chen, 2018; Su and Fu, 2022), and support elements (Lipovac et alii, 2022);
- studies that have highlighted the enabling factors specific to physical space for the performance of home care (Carnemolla and Bridge, 2018; Pi- atkowski, Abushousheh and Taylor, 2019; Pet- tersson et alii, 2020);

- guidelines and models for certifying age-friendly housing (e.g., Lifetime Home Criteria, Livable Housing Guidelines, Homes4Life, etc.);
- design guidance for furniture selection in institutional long-term residential facilities (Chambers and Bowman, 2011; Malone and Dellinger, 2011; Jonsson et alii, 2014; Wang, Shi and Niu, 2021).

This survey shows that age-friendly and care-friendly furniture should ensure the safety of caregivers and the safety of caregivers and, therefore, be free of sharp edges that could pose a hazard in the event of impact but also be composed of and covered with materials that do not emit VOCs or other pollutants, have a low reaction to fire, and, in the event of combustion, do not develop toxic fumes. The elderly's higher vulnerability to infection also requires that furnishings be easily cleaned and sanitised. It is equally essential that furnishings (especially in the case of those with a large

surface area, such as closets or headboards of the bed) be covered with materials with photometric characteristics that maximise natural light as essential support for the circadian cycle and care activities and that do not interfere with the assessment of the complexion colour of the care recipient.

To ensure an adequate level of acoustic comfort and tactile well-being, it is also desirable that, where the caregiver spends most of their time, furnishings be composed of sound-absorbing materials with tactile pleasantness characteristics. On a psychological level, it is essential that furnishings, while suitable for use in caregiving activities, maintain a domestic appearance, favouring upholstery materials with a natural appearance and free of stigmatising elements that hint at use dedicated to people with disabilities or with an institutional appearance.

sub-criteria	score	weights	categories	partial score	weights
1a. Low reaction to fire	1a	1	1. Safety	0.77	0.27
1b. Rounded edges	1b	1			
1c. Stability	1c	0.5			
1d. Low VOC emission	1d	1			
2a. Sound absorption	2a	0.5	2. Comfort	0.58	0.11
2b. Pleasant to touch (low thermal conductivity)	2b	1			
3a. Easy to move	3a	1	3. Usability/ Flexibility	1.00	0.18
3b. Versatility	3b	1			
3c. Affordance/ user-friendliness	3c	1			
4a. Natural appearance	4a	1	4. Appearance	1.00	0.08
4b. Home look	4b	1			
5a. Easy to clean	5a	1	5. Management	1.00	0.16
5b. Resistance to scratches and wear	5b	1			
6a. Integrability with smart / IoT systems	6a	0	6. Integrability	0.00	0.01
7a. Sustainable manufacturing	7a	0.5			
7b. Recyclability	7b	0	7. Environmental Protection	0.25	0.11
8a. Separability	8a	0.5			
8b. Transferability	8b	0	8. Modularity/ Customisation	0.58	0.09
8c. Specificity	8c	1			
8d. Possibility of customisation	8d	1			



FINAL SCORE:
0.76 /1

Fig. 7 | Example of visualisation of partial results and the overall score of evaluated product performance (credit: the Authors, 2023).

Regarding the functionality of the space, the furniture must be arranged so that it does not hinder the comings and goings of users. Therefore, it is advantageous to have versatile furniture, i.e., that can be used for multiple purposes, flexible in terms of easy removability and, at the same time, in the case where it can be used as support elements by the user, be stable and equipped with locking systems. In addition, renewed instances of sustainability dictate the use of eco-friendly products from a life-cycle perspective and, consequently, durable, easily maintained and recyclable, with the possibility of replacing parts of them to ensure reuse. The potential of integrating furnishings with ICT technologies for Ambient Assisted Living would also help facilitate many of the care tasks, such as monitoring the health conditions of caregivers and controlling environmental factors within the home space (Mangiatoridi, 2020).

Both to conserve resources and to respond to the changeability and unpredictability that characterise the complex and demanding framework of the elderly population, often caused by the progressive loss of autonomy, it is a priority to pay attention to the selection of products made according to a modular construction approach, precisely to configure space adaptively to multiple needs, including those related to care activities. For this reason, further investigation was given to case studies and best practices of housing and housing for the elderly focused on modular design, flexibility and furniture features that facilitate the creation of more usable and safe spaces, such as the Garden Loft in Calgary, Canada, and the Borgo Mazzini Smart Co-Housing in Treviso, Italy.

The Garden Loft case study concerns a prefabricated dwelling specifically designed to accommodate an elderly user by allowing them to move in close to a family member's residence. The

dwelling represents an evolution of the Future Adaptive Building System² where the design of the interior spaces and furnishings is conceived to adapt to the inhabitants' residual capacities by taking advantage of a series of prefabricated modular components (kitchen and bathroom cabinets as well as wall units; bookcases, cabinets, etc.) that replace traditional partitions and can be easily rearranged to customise and change the configuration of the rooms over time (Fig. 1; Brown, 2018).

Modular storage units also allow for the concealment of any medical devices that can be discreetly placed through a plug-and-play system within the cabinets or headboard of the bed (Fig. 2), while other furniture elements can be easily integrated with support bars and LED devices activated by motion sensors (Fig. 3). Furniture features standardised, interchangeable components that allow a wide variety of configurations and are integrated with wall coverings, suspended ceiling elements, or equipped walls that camouflage plant systems and medical devices.

The second case study, on the Borgo Mazzini Smart Co-Housing project, involved the redevelopment of a historic building to create housing for the elderly equipped with furnishings that meet Universal Design criteria, favouring modular solutions with the possibility of customisation by residents (Fig. 4; Uliana and Mosconi, 2018).

Although both case studies represent virtuous examples, in line with the objectives and design approach responsive to the needs of the assisted elderly, and while recognising the effectiveness of the solutions adopted, the same might be difficult to transfer because, in the first case, they are experiments more appropriate to interventions of new construction / expansion, while in the second the choice of modules was carefully considered according to the reference context. Replicability of

the observed solutions would, therefore, imply a congruence of the starting assumptions (user needs, specific care pathways, technical characteristics of care spaces, etc.) that are unlikely to occur. These case studies, therefore, allowed us not so much to appreciate the specific furnishing solutions but rather to identify the design criteria followed for the construction of housing that meets the needs of the elderly and caregivers.

What emerges from the literature survey and observation of the case studies is that the multiple and heterogeneous requirements that furniture must meet often make it complex at the design stage to identify a single optimal solution. This complexity makes it appropriate to employ specific operational tools useful in selecting home care furniture for use by designers and decision-makers involved in both new builds and home adaptation for ageing in place.

Among the tools useful for this purpose, Malone and Dellinger (2011) propose a checklist for selecting furnishings within healthcare facilities, allowing each piece of furniture to be checked for compliance with a set of requirements. However, by not contemplating the assignment of a score expressing the degree to which the furniture meets the requirements, the tool is less effective in comparing alternative solutions that meet the same number of items.

More appropriate for this purpose is the adoption of multicriteria analysis techniques, among which AHP is the one that finds the most excellent applicability in the architectural field due to its expeditious nature and the flexibility and expandability of the evaluation system (Ogrodnik, 2019); in fact, it allows for the comparison and ranking of different alternatives through the decomposition of a general objective into a series of criteria (quantitative and qualitative in nature) hierarchi-

cally ranked according to priority levels defined by the decision maker.

Several studies see the application of the AHP multicriteria evaluation technique for the design of furniture (Varol, 2023; Liu et alii, 2023) as well as for their selection in areas other than the one under study, such as schools (Salomon, Alonso and Silva Marins, 2016; Khoshabi et alii, 2020). However, to date, there is still no tool specifically dedicated to the evaluation and selection of home care furniture. Therefore, the following sections of the paper describe the methodological steps followed to build the framework of a new multicriteria evaluation tool designed to be used when selecting furniture to design environments suitable for home care activities.

Methodology and stages of the research | This paper traces the methodological approach proper to the technological design culture adopted in the research, which considers the adaptability of housing in relation to the study of care use patterns in order to reconfigure the space with modular, customisable and multifunctional furniture, with reference to the principles of Universal Design. The methodology adopted in the research involved 4 phases (Fig. 5).

In the first phase, in line with the demand-performance approach, a reconnaissance and systematisation of information found from a literature study regarding the optimal characteristics (technological requirements) of furniture dedicated to the elderly population in need of care and from the study conducted in the field through interviews with caregivers and care staff was implemented to gain a deeper understanding of home care-related activities.

Following this reconnaissance, the second phase was aimed at structuring the multi-criteria evaluation tool, referring to the AHP technique that allows scoring of several alternatives (in this case furniture) expressed by the weighted sum-

mation of the number (and degree) of criteria met, through the following steps: 1) definition of the criteria, evaluation sub-criteria and their success indicators; 2) assignment of weights to each criterion and sub-criteria; and 3) implementation of the multi-criteria evaluation tool in spreadsheets within Microsoft Excel software.

To define the evaluation criteria and sub-criteria, the technological requirements identified in the first phase were organised within 7 categories referring to the requirement classes of UNI8289, viz: safety (in use and fire), well-being (visual, olfactory and emission quality, tactile), usability (usability and flexibility of use), appearance (domesticity character and sensory / perceptual characters, textures, colours), management (maintainability, cleanability, durability, reparability, replaceability) plant integrability and environmental protection (sustainability of production and recyclability of components). To these was added an eighth category related to modularity / customisation, which is essential to identify the most effective furniture solutions in home care consequent to users' changing and hardly predictable needs.

With respect to the characteristics inherent in modularity, the research focused on the selection of products characterised by the requirements of separability (the degree to which the product can be disassembled and recombined into a new configuration without losing functionality), specificity (the ability of a component to have a clear, unique and defined function with its interfaces in the system-product), and transferability (degree to which components of a system-product can be reused within another system). With regard to customisation, the availability of a product in different finish options for material, colour and texture was considered.

For each evaluation sub-criterion, a specific indicator was then defined to express, in both quantitative and qualitative aspects, the level of satisfaction by the furniture of the requirements considered

through a discrete value scale, represented by the scores 0 (requirement not met); 0.5 (requirement partially met) and 1 (requirement fully met).

The list of the 8 criteria categories, 20 sub-criteria and their indicators are represented in Table 1. The assignment of weights for the categories and sub-criteria was implemented by pairwise comparison, referring to the scale of values proposed by Saaty (2008), shown in Table 2. A symmetrical matrix was then prepared for the set of 8 categories, each illustrating the relative importance of each criterion in relation to the others (Tabb. 3-10). The calculation of the criteria weights, normalised between 0 and 1, was obtained through the summation of the terms in each row, divided by the sum of all terms in the matrix (Al-Saggaf et alii, 2020). Then, the final score (between 0 and 1) given to furniture will be obtained from the weighted summation of the partial scores for each category of criteria, expressed by the weighted summations of the partial scores for each sub-criterion.

Once the evaluation tool was prepared, the third phase of the research was dedicated to a market survey – performed online by referring to the websites of furniture companies accredited at major national and international events and exhibitions – aimed at sharing knowledge, innovations and best practices in the field of health and well-being of the elderly population (e.g. Exosanità, AgeingFit), through which the top 7 companies (including those specialising in furniture dedicated to residential health and social care facilities) were identified and, using the previously defined evaluation tool, the products were analysed, selecting those with scores greater than or equal to a sufficiency threshold, corresponding to the value of 0.5.

This selection made it possible to structure, in the fourth phase, an initial repertoire of responding solutions (database), potentially expandable in future research developments. The database was implemented as tables in Microsoft Excel, subdividing the products sourced from the market sur-

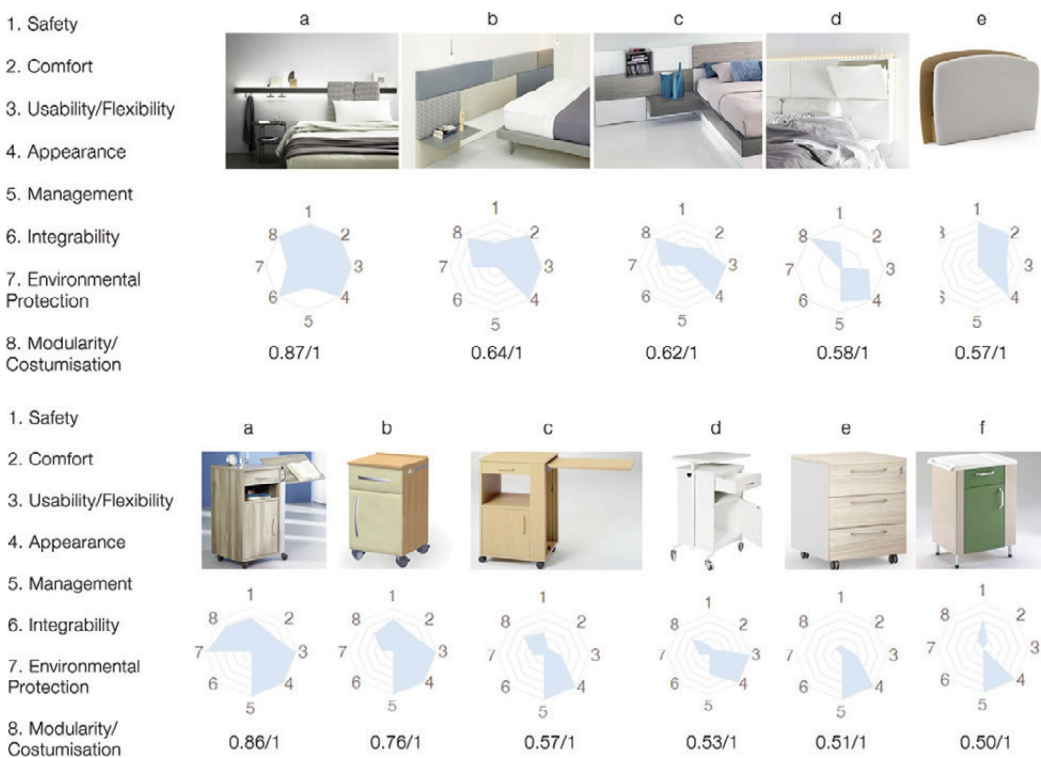







Fig. 8, 9 | Examples of result display and product classification: Bed headboards; Bedside tables (credits: the Authors, 2023).

manufacturer	link	type	name	link	1a. Low reaction to fire	1b. Rounded edges	1c. Stability	1d. Low VOC emission	2a. Sound absorption	2b. Pleasant to touch (low thermal conductivity)	3a. Easy to move	3b. Versatility	3c. Affordable/ user-friendliness	4a. Natural appearance	4b. Home look	5a. Easy to clean	5b. Resistance to scratches and wear	6a. Integrability with smart / IoT systems	7a. Sustainable manufacturing	7b. Recyclability	8a. Separability	8b. Transferability	8c. Specificity	8d. Possibility of customisation	1. SAFETY	2. COMFORT	3. USABILITY	4. APPEARANCE	5. MANAGEMENT	6. INTEGRABILITY	7. ENVIRONMENTAL PROTECTION	8. MODULARITY/ CUSTOMISATION	FINAL SCORE
CF	https://v	bed	LETTO ELETTRICO LI	https://v	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.50	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.17	0.96	0.06	1.00	0.00	0.50	0.32	0.70
CF	https://v	bed	LETTO ELETTRICO FL	https://v	0.50	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.76	0.00	0.96	0.06	0.75	1.00	0.50	0.32	0.63
CF	https://v	bed	LETTO ELETTRICO BE	https://v	1.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.00	0.50	0.00	1.00	0.50	0.00	1.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.95	0.00	0.78	0.06	0.75	1.00	0.25	0.00	0.56
CF	https://v	bed table	COMODINO SU PIEDI	https://v	1.00	0.50	0.50	1.00	0.50	0.50	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	1.00	0.00	0.72	0.50	0.04	0.13	0.75	0.00	0.00	0.16	0.40
CF	https://v	cabinet	TE1740 - ARMADIO DE	https://v	0.50	0.50	0.00	0.50	0.50	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.27	0.58	0.60	0.13	0.25	0.00	0.50	0.79	0.42
CF	https://v	cabinet	TE3217 - ELEMENTO C	https://v	1.00	0.50	0.00	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.50	0.00	1.00	0.50	0.00	1.00	1.00	0.00	0.41	0.50	1.00	0.00	0.50	1.00	0.25	0.79	0.53
TE	https://v	bed	LINEA EVO - LETTO E	https://v	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.72	0.00	0.64	0.88	0.50	0.00	0.00	0.32	0.49
TE	https://v	bed	INDIANA - LETTO ELE	https://v	1.00	0.50	0.00	0.00	1.00	0.00	0.50	0.50	0.00	1.00	0.50	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00	0.33	0.83	0.20	0.56	0.75	0.00	1.00	0.13	0.57
TE	https://v	bed	LINEA ELITE - LETTO I	https://v	0.50	0.00	0.50	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	0.50	0.00	1.00	1.00	0.50	0.53	0.17	1.00	0.44	0.50	0.50	0.75	0.39	0.49
TE	https://v	seating	Linea Poltrone e Divani	https://v	1.00	0.00	0.50	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.50	0.50	1.00	0.50	0.50	1.00	0.50	0.50	1.00	1.00	0.50	0.59	0.83	1.00	0.06	0.75	0.50	0.75	0.79	0.71
TE	https://v	seating	Linea Poltrone e Divani	https://v	1.00	1.00	0.00	1.00	0.50	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.50	0.00	1.00	1.00	0.50	0.00	1.00	0.53	0.42	0.36	0.88	0.50	0.50	0.50	0.84	0.54
ER	https://v	seating	Melodie 1001	https://v	1.00	1.00	0.50	0.50	0.50	0.00	0.50	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.50	1.00	0.50	0.50	0.69	0.42	0.78	0.88	0.75	0.00	0.00	0.60	0.61
ER	https://v	seating	Melodie 2001	https://v	0.50	0.50	0.50	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.42	1.00	0.30	0.44	1.00	0.50	0.50	0.37	0.56
ER	https://v	seating	Melodie 3001	https://v	0.50	0.00	1.00	1.00	0.50	0.50	0.00	0.50	0.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.50	1.00	0.50	0.00	1.00	0.00	0.00	0.76	0.50	0.02	0.94	0.00	1.00	0.25	0.74	0.45
ER	https://v	seating	Melodie 5001	https://v	1.00	0.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50	0.00	1.00	0.50	0.00	1.00	1.00	0.50	0.51	0.42	0.18	0.44	0.25	1.00	0.25	0.42	0.37	
Har	https://v	boiserie / headboard	Boiserie Retroletto cod.	https://v	1.00	0.00	1.00	0.00	0.50	0.50	0.50	0.00	1.00	0.00	0.50	0.00	0.50	1.00	0.50	0.00	1.00	0.00	1.00	0.75	0.50	0.78	0.44	0.25	1.00	0.25	0.74	0.57	
Har	https://v	bed table	Comodino cod. AC-005	https://v	1.00	0.50	1.00	0.00	0.00	0.50	1.00	0.50	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.50	0.50	1.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.79	0.08	0.38	1.00	0.50	0.50	0.75	0.63	0.59
Har	https://v	tables	Tavolo cod. AC-006	https://v	0.50	0.50	0.00	0.50	0.00	1.00	0.50	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.50	0.00	0.50	0.00	1.00	0.00	0.00	0.27	0.17	0.78	1.00	0.50	0.50	0.25	0.21	0.44
Har	https://v	storage units	Appendiabili a parete ct	https://v	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.50	1.00	0.00	0.00	0.50	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.00	1.00	0.50	0.50	0.25	1.00	0.22	0.44	0.75	0.50	0.25	0.55	0.45
Har	https://v	mobile partition	Pannelli divisori acustici	https://v	0.00	0.50	1.00	0.50	0.50	0.00	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.00	0.50	0.50	1.00	0.59	0.42	0.80	1.00	0.75	1.00	0.50	0.69	0.67	

Fig. 10 | Table evaluation and selection of the most responsive products for home-care use (credit: the Authors, 2023).

Fig. 11 | Example of database product sheets (credit: the Authors, 2023).

manufacturer	link	type	name	link	PARTIAL SCORES								FINAL SCORE	image	dimensions (cm)			installation	cost (€)
					1. SAFETY	2. COMFORT	3. USABILITY	4. APPEARANCE	5. MANAGEMENT	6. INTEGRABILITY	7. ENVIRONMENTAL PROTECTION	8. MODULARITY/ CUSTOMISATION			l	w	h		
CF	https://v	cabinet	ARMZ	https://v	0.28	0.42	0.30	0.88	0.75	1.00	0.55	0.53		120	60	190	Placed on the ground and fixed to the wall	896.76	
CF	https://v	cabinet	TE17E	https://v	0.63	0.17	0.98	0.00	1.00	1.00	0.21	0.57		60	60	230	Placed on the ground and fixed to the wall	448.38	
CF	https://v	cabinet	TE17E	https://v	0.84	0.83	0.60	0.94	0.50	0.00	0.53	0.63		110	40	230	Placed on the ground and fixed to the wall	298.90	
Har	https://v	cabinet	ARMZ	https://v	0.73	0.00	0.70	0.44	0.75	1.00	0.42	0.55		90	51	195	Placed on the ground and fixed to the wall	250.00	
Har	https://v	cabinet	ARMZ	https://v	0.92	0.42	0.62	0.00	0.50	0.00	0.50	0.54		120	51	195	Placed on the ground and fixed to the wall	285.00	

vey according to function: beds, seating, storage units, tables, lighting fixtures, and mobile partitioning elements. Within the database, for each product, the manufacturer, the name and catalogue code, a representative image and the QR code with the link to the manufacturer’s website where the technical information needed to implement the multi-criteria evaluation was found. In addition, for each product the scores for each sub-criterion, the scores by category and the overall score are given.

Results and limitations | Main outcome of the research was the definition and implementation of a multicriteria home care furniture evaluation tool designed to be used by designers in the case of home adaptation or new design. The tool consists of an editable file using Excel software within which the evaluator fills in a table based on technical information about the furniture / product he or she intends to evaluate (Fig. 6). Each value entered by the evaluator (0; 0.5 or 1) is multiplied by the pre-defined weighting system, resulting in a series of partial scores that establish the product’s performance broken down by category. These partial scores are multiplied by the weight assigned to each category, allowing for an overall score asso-

ciated with the furniture under consideration. The partial results for each sub-criterion, the results broken down by the 8 categories, and the final score expressing the level of performance of the furniture (0 to 1) can be visualised by means of a pair of polar diagrams (or spyder charts), as exemplified in Figure 7.

The proposed evaluation system allows decisions to be based on a more objective measurement of the performance provided by a furniture component with respect to the requirements connoting home care, making it possible not only to discard solutions that do not meet a certain score threshold but also to more easily compare those found to be more responsive (compliant alternative solutions). By way of example, the outcomes of the evaluation for 8 alternative solutions of bed headboards and 6 bedside tables are shown (Fig. 8, 9). In the first case, the system made it possible to compare products and identify those that, with equal performance in terms of safety of use, comfort and functionality, lent themselves to greater customisation by users in terms of configurations and finishes. In the second case, the tool highlighted those products with greater flexibility and versatility in the possibilities of use, proving, also in this second application, to be a valuable

support capable of guiding the designer’s choices at the decision-making stage.

The tool, thus conceived, was used to evaluate 130 products found by an initial online market survey (Fig. 10): 85 products scored above 0.5 and were entered into the database in Excel (Fig. 11) where, for each product, a series of information was added (product size, installation characteristics, cost, etc.) useful for relating the product to the contextual conditions in which the designer will operate. This database constitutes the second product of the research in that it represents an initial reconnaissance of furniture found to meet the requirements and, therefore, most suitable for use within homes potentially called upon to host home care activities.

Among the main limitations that can be observed is the fact that, to date, the tool has made it possible to identify furnishing solutions that, although they meet the pre-established requirements, have been analysed in an absolute way, that is, divorced from a specific context (housing) in which to be inserted. Therefore, since the effectiveness of technical furniture solutions strongly depends on the relationships they establish with the domestic space, especially in cases where the dwelling is undergoing renovation / re-functional-

ization, it is essential that the designer selects products not only according to the performance levels of the object itself but also with respect to their correct sizing according to the available space, harmonisation or colour contrast between the furniture and the surfaces, technical constraints for their installation, etc.

To compensate for this limitation, today's version of the evaluation system is designed to reward furniture that, in addition to being functional, ergonomic and ecologically as well as environmentally sustainable, possesses modular and customisation features that make it more adaptable to different contexts. Therefore, in future research steps, additional categories and evaluation criteria will be implemented that will be useful for verifying furniture compatibility with specific context conditions (technical, economic aspects, etc.) to be considered at the design stage.

Conclusions and future developments | From the study conducted, it emerges that the interest and recent operational documentation produced nationally and in Europe for the implementation of home care focuses almost exclusively on the type of social-health service, the virtual model and the management of telehealth, while to date the connotative requirements of furnishings, equipment and spatial configurations to best organise the physical locations where planned social-health services are to be provided have not been defined.

The research described in this paper, starting from the definition of criteria useful for the selection of furniture meeting the requirements connoting home care, involved the development of two tools: a multi-criteria evaluation tool for the selection of products based on a logic of sharing and interchange of technical information from the market, including safety of use, functionality, modularity, modularity, adaptability, equipability, flexibility of use, maintainability, integrability with smart technologies, etc.; a database containing products found to be most suitable for use in spaces where home care activities are implemented.

In particular, the contribution aimed to show how, through the use of prioritised modular components, it is possible to optimise the adaptability project through the assembly of a system-product to which supportive and prosthetic functions can be delegated, customisable according to the

specific assistive pathways to be implemented in the home, also to encourage a preventive approach according to which the adaptability of the home space can be evaluated to accommodate future modifications and additions that care activities would make necessary.

With respect to what has been produced in the research to date, in addition to the introduction of new steps that may make the multicriteria analysis more refined and allow some of the previously discussed limitations to be overcome, further developments will involve the implementation of both the multicriteria evaluation system and the database of home-care-compatible furniture solutions in a BIM environment. The aim is to benefit from the advantages offered by the digitisation of technical information, which, transformed into 'dynamic objects' connected to the modelling of housing spaces, will allow for easier verification of product suitability, making it possible to overcome the traditional manual process operated by designers during the selection of the most appropriate solutions.

Adapting housing to become more inclusive and responsive to the needs of the elderly is a crucial issue in the current socio-demographic scenario. Therefore, the definition of support tools aimed at designers, as actors who can strongly influence the realisation of more appropriate living spaces for the elderly population, can have significant implications at the cultural level, as it could stimulate greater awareness and sensitization toward a design approach that is attentive to issues related to the use of spaces by frail users.

What has been produced as part of the research offers a first response in terms of advanced design and simulation tools to support the decision-making process of verification and adaptability of home care housing and could, from a social point of view, significantly improve the quality of living spaces for the assisted (and working) caregivers by ensuring safer, more comfortable, functional and personalised environments. From the economic aspect, the preventive approach promoted, which favours the use of modular, flexible furniture that can be integrated with smart devices, could also contribute to the contraction of costs associated with the need for onerous modifications or continuous adaptations of housing over time, as well as encourage more environmen-

tally conscious design in terms of spillovers to environmental sustainability.

Finally, the development of shared metrics for assessing the appropriateness of products on the market with respect to the needs of the elderly, as the fastest-growing segment of the population in the coming decades, could hopefully help incentivise the manufacturing sector toward a greater diversification of the supply of furniture suited to the needs of the assisted elderly and, at the same time, with more appealing perceptual-sensory characteristics by virtue of a more effective harmonisation with the domestic space, including in terms of morphological quality.

Notes

1) Research funded by 'Sapienza' University of Rome entitled 'Domestic space and home care – Configuration and multi-parametric evaluation of furniture and interior finishes', Scientific Responsible: Prof. Arch. T. Villani; Research Group Member: Arch. PhD F. Romagnoli.

2) The FABhome system was conceived in 2016 by John Brown as part of a Doctoral Research. The design was refined at the School of Architecture, Planning and Landscape at the University of Calgary and developed by Housebrand, a residential design and construction company co-founded by J. Brown with C. van Olm and M. North. The same concept is employed today to create prefabricated housing units called Garden Lofts.

References

- Al-Saggaf, A., Nasir, H. and Hegazy, T. (2020), "An Analytical Hierarchy Process-based system to evaluate the lifecycle performance of buildings at early design stage", in *Journal of Building Engineering*, vol. 31, article 101364, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2020.101364 [Accessed 10 October 2023].
- Blackler, A., Brophy, C., O'Reilly, M. and Chamorro-Koc, M. (2018), "Seating in aged care – Physical fit, independence and comfort", in *SAGE Open Medicine*, vol. 6, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1177/2050312117744925 [Accessed 10 October 2023].
- Brown, J. L. (2018), "Future Adaptive Building – Mass-Customized Housing for an Aging Population", in Kolare-

vic, B. and Duarte J. P. (eds), *Mass Customization and Design Democratization*, Routledge, London and New York, pp. 176-185.

Carnemolla, P. and Bridge, C. (2018), "A scoping review of home modification interventions – Mapping the evidence base", in *Indoor and Built Environment*, vol. 29, issue 3, pp. 299-310. [Online] Available at: doi.org/10.1177/1420326X187611 [Accessed 10 October 2023].

Chambers, M. and Bowman, K. L. (2011), "Finishes and furnishings – Considerations for critical care environments", in *Critical Care Nursing Quarterly*, vol. 34, issue 4, pp. 317-331. [Online] Available at: doi.org/10.1097/CNQ.0b013e31822bad05 [Accessed 10 October 2023].

EEG – European Expert Group (2022), *EU Guidance on independent living and inclusion in the community –Euro-*

- pean Expert Group on the transition from institutional to community-based care. [Online] Available at: deinstitutionalisationdotcom.files.wordpress.com/2022/12/eu-guidance-on-independent-living-and-inclusion-in-the-community-2-1.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Fabisiak, B., Jankowska, A., Klos, R., Knudsen, J., Merilampi, S. and Priedulena, E. (2021), "Comparative study on design and functionality requirements for senior-friendly furniture for sitting", in *BioResources*, vol. 16, issue 3, pp. 6244-6266. [Online] Available at: doi.org/10.15376/biores.16.3.6244-6266 [Accessed 10 October 2023].
- Genet, N., Boerma, W. G. W., Kringos, D. S., Bouman, A., Francke, A. L., Fagerström, C., Melchiorre, M. G., Greco, C. and Devillé, W. (2011), "Home care in Europe – A systematic literature review", in *BMC Health Services Research*, vol. 11, article 207, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1186/1472-6963-11-207 [Accessed 10 October 2023].
- Giunco, F. (2014), *Abitare Leggero – Verso una nuova generazione di servizi per anziani*, Fondazione Cariplo. [Online] Available at: doi.org/10.4460/2014quaderno17 [Accessed 12 October 2023].
- Governo Italiano (2021), *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza*. [Online] Available at: governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Jonsson, O., Östlund, B., Warell, A. and Dalholm Hornyánszky, E. (2014), "Furniture in Swedish Nursing Homes – A Design Perspective on Perceived Meanings within the Physical Environment", in *Journal of Interior Design*, vol. 39, issue 2, pp. 17-35. [Online] Available at: doi.org/10.1111/joid.12028 [Accessed 10 October 2023].
- Khoshabi, P., Nejati, E., Ahmadi, S. F., Chegini, A., Makui, A. and Ghousi, R. (2020), "Developing a Multi-Criteria Decision Making approach to compare types of classroom furniture considering mismatches for anthropometric measures of university students", in *PLoS ONE*, vol. 15, issue 9, article e0239297, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.1371/journal.pone.0239297 [Accessed 10 October 2023].
- Mantoan, D and Borghini, A. (2021), "Potenziamento dell'assistenza sanitaria e della rete sanitaria territoriale", in *Monitor*, vol. 45, pp. 10-13. [Online] Available at: quotidianosanita.it/allegati/allegato1456711.pdf [Accessed 12 October 2023].
- Lawton, M. P. and Nahemow, L. (1973), "Ecology and the aging process", in Eisdorfer, C. and Lawton M. P. (eds), *The psychology of adult development and aging*, American Psychological Association, Washington, pp. 619-674. [Online] Available at: doi.org/10.1037/10044-020 [Accessed 10 October 2023].
- Lipovac, D., Wie, S., Nyrud, A. Q. and Burnard, M. D. (2022), "Perception and evaluation of (modified) wood by older adults from Slovenia and Norway", in *Wood and Fiber Science*, vol. 54, issue 1, pp. 45-59. [Online] Available at: doi.org/10.22382/wfs-2022-05 [Accessed 10 October 2023].
- Liu, M., Zhu, X., Chen, Y. and Kong, Q. (2023), "Evaluation and design of dining room chair based on analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy AHP", in *BioResources*, vol. 18, issue 2, pp. 2574-2588. [Online] Available at: doi.org/10.15376/biores.18.2.2574-2588 [Accessed 10 October 2023].
- Magarò, A. and Baratta, A. F. L. (2019), "Machine Learning e Architetture Sicure e Inclusive per una Utente Fragile | Machine Learning and Safe and Inclusive Architecture for Fragile Users", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 109-116. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-93095122019 [Accessed 10 October 2023].
- Malone, E. B. and Dellinger, B. A. (2011), *Furniture Design Features and Healthcare Outcomes*, The Center for Health Design. [Online] Available at: brikbasedesign.org/sites/default/files/chd_furniture_outcomes.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Mangiardi, A. (2020), "Abitare per anziani e tecnologie digitali – Prospettive, processi e scenari futuri | Housing for the elderly and digital technologies – Perspectives, processes and future scenarios", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 128-137. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8122020 [Accessed 10 October 2023].
- Merilampi, S., Poberžnik, A., Saari, S., Serrano, J. A., Güttler, J., Langosch, K., Bock, T., Zou, L. and Magne, T. A. (2020), "Modular smart furniture system for independent living of older adults- user experience study", in *Gerontechnology | Official Journal of the International Society for Gerontechnology*, vol. 19, issue 4, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.4017/gt.2020.19.04.392 [Accessed 10 October 2023].
- Ogrodnik, K. (2019), "Multi-Criteria Analysis of Design Solutions in Architecture and Engineering – Review of Applications and a Case Study", in *Buildings*, vol. 9, issue 12, article 244, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings9120244 [Accessed 10 October 2023].
- Pani-Harreman, K. E., Bours, G. J. J., Zander, I., Kempen, G. I. J. M. and van Duren, J. M. A. (2021), "Definitions, key themes and aspects of 'ageing in place' – A scoping review", in *Ageing & Society*, vol. 41, issue 9, pp. 2026-2059. [Online] Available at: doi.org/10.1017/S0144686X20000094 [Accessed 10 October 2023].
- Pettersson, C., Malmqvist, I., Gromark, S. and Wijk, H. (2020), "Enablers and Barriers in the Physical Environment of Care for Older People in Ordinary Housing – A Scoping Review", in *Journal of Aging and Environment*, vol. 34, issue 3, pp. 332-350. [Online] Available at: doi.org/10.1080/02763893.2019.1683671 [Accessed 10 October 2023].
- Piatkowski, M., Abushousheh, A. and Taylor, E. (2019), *Healthcare at Home – A white paper supporting the Center for Health Design Interactive Diagrams*, The Center for Health Design, Concord (CA). [Online] Available at: healthdesign.org/system/files/res_files/White%20Paper_Healthcare%20at%20Home_2019_0.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Salomon, V. A. P., Alonso, P. J. and Silva Marins, F. A. (2016), "Multi-criteria decision analysis of classrooms standardisation in a higher education institution", in *International Journal of Business and Systems Research*, vol. 10, issue 2-4, pp. 394-402. [Online] Available at: doi.org/10.1504/IJBSR.2016.075756 [Accessed 10 October 2023].
- Saaty, T. L. (2008), "Decision making with the analytic hierarchy process", in *International Journal of Services Sciences*, vol. 1, issue 1, pp. 83-98. [Online] Available at: doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590 [Accessed 10 October 2023].
- Saaty, T. L. (1980), *Decision Making – The Analytic Hierarchy Process – Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGraw-Hill, New York.
- Sheth, S. and Cogle, C. R. (2023), "Home Modifications for Older Adults – A Systematic Review", in *Journal of Applied Gerontology*, vol. 42, issue 5, pp. 1151-1164. [Online] Available at: doi.org/10.1177/07334648231151669 [Accessed 10 October 2023].
- Shi, X. and Zhang, F. (2023), "Analysis of the Hanging Actions and Operating Heights of Storage Furniture Suitable for the Elderly", in *Sensors*, vol. 23, issue 8, article 3850, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/s23083850 [Accessed 10 October 2023].
- Su, X. and Fu, R. (2022), "A Bed Design Model Research for the Self-care Elderly", in Duffy, V. G. (ed.), *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management – Anthropometry, Human Behavior, and Communication – HCII 2022*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 13319, Springer, Cham, pp. 135-147. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-05890-5_11 [Accessed 10 October 2023].
- Uliana, M. A. and Mosconi M. (2018), "Aspettando Borgo Mazzini Smart Cohousing | Waiting for Borgo Mazzini Smart Cohousing", in Baratta, A. F. L., Farina, M., Finucci, F., Formica, G., Giancotti, A., Montuori, L. and Palmieri, V. (eds), *Abitazioni Sicure e Inclusive per Anziani | Safe and inclusive Housing for an Aging Society*, Edizioni Antefarma, Roma, pp. 109-118. [Online] Available at: israa.it/file/borgo_mazzini/rassegna_stamp/Uliana%20Mosconi%20Roma%20Tre.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Varol, A. (2023), "Determining and Ordering the Basic Evaluation Criteria in the Furniture Design Process", in *ICONARP International Journal of Architecture and Planning*, vol. 11, issue 1, pp. 519-537. [Online] Available at: doi.org/10.15320/ICONARP.2023.252 [Accessed 10 October 2023].
- Wang, X., Shi, R. and Niu, F. (2022), "Optimization of furniture configuration for residential living room spaces in quality elderly care communities in Macao", in *Frontiers of Architectural Research*, vol. 11, issue 2, pp. 357-373. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.foar.2021.11.002 [Accessed 10 October 2023].
- WEF – World Economic Forum (2020), "Safer, Cheaper and Healthier – It's Time to Look Again at Home Care for Older People", in *weforum.org*, 13/10/2020. [Online] Available at: weforum.org/agenda/2020/10/why-home-could-be-the-safest-place-for-seniors-during-the-pandemic/ [Accessed 10 October 2023].
- WHO – World Health Organization (2020), *UN Decade of Healthy Ageing – Plan of Action – 2021-2030*. [Online] Available at: cdn.who.int/media/docs/default-source/decade-of-healthy-ageing/decade-proposal-final-apr2020-en.pdf?sfvrsn=b4b75ebc_28 [Accessed 10 October 2023].
- WHO – World Health Organization (2001), *ICF – International Classification of Functioning, Disability and Health*. [Online] Available at: apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42407/9241545429.pdf?sequence=1 [Accessed 10 October 2023].
- Zhan, G., Lyu, J. and Chen, M. (2018), "Research and Design of multifunctional nursing bed for Elderly People", in *IOP Conference Series | Materials Science and Engineering*, vol. 394, issue 3, article 032131, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1757-899X/394/3/032131 [Accessed 10 October 2023].
- Zhang, J. and HJ. Shanat, M. bin (2023), "Research on Design and Development of Elder-Friendly Furniture in Chinese Residential Situation", in *Art and Society*, vol. 2, issue 3, pp. 32-37. [Online] Available at: paradigmppress.org/as/article/view/625 [Accessed 10 October 2023].

ARTICLE INFO

Received 08 September 2023
Revised 23 October 2023
Accepted 05 November 2023
Published 31 December 2023

MODULI NEARLY ZERO ENERGY

Modelli abitativi a basso impatto ambientale per la città del futuro

NEARLY ZERO ENERGY MODULES

Low-impact modular housing models for the city of the future

Rosa Romano, Eleonora Di Monte

ABSTRACT

Il paper presenta alcuni degli esiti della ricerca nZEM (nearly Zero Energy Module), finalizzata a promuovere lo sviluppo e la prototipazione di elementi costruttivi modulari e flessibili in platform frame caratterizzati dall'integrazione di soluzioni tecnologiche d'involucro e d'impianto innovative, e realizzati per rispondere a varie esigenze funzionali e tecnico-normative (risparmio ed efficienza energetica, comfort indoor, accessibilità, sicurezza strutturale) nel rispetto della compatibilità ambientale. Il progetto – finanziato dalla regione Toscana nell'ambito dei bandi POR CREO 2020-2024 – è stato sviluppato da un consorzio costituito da organismi di ricerca e aziende, che hanno lavorato in sinergia per promuovere l'ottimizzazione di processo connessa al concetto di Industria 4.0 e al tema dell'economia circolare attraverso l'adozione di processi di 'innovazione aperta'.

This paper presents some of the outcomes of the nZEM (nearly Zero Energy Module) research, aimed at promoting the development and prototyping of modular and flexible building elements in platform frames characterised by the integration of innovative building envelope and system solutions. These modules are designed to address various functional and technical-regulatory needs, including energy savings, energy efficiency, indoor comfort, accessibility, and structural safety while adhering to environmental compatibility. The project, funded by the Tuscany region under the calls for POR CREO 2020-2024, was developed by a consortium comprising research institutions and companies. They collaborated synergistically to promote process optimisation related to the concept of Industry 4.0 and the circular economy theme by adopting open innovation processes.

KEYWORDS

moduli nearly zero energy, platform frame, finestre intelligenti, prefabbricazione, industria 4.0

nZEM, platform frame building system, smart windows, prefabrication, industry 4.0

Rosa Romano, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture, University of Florence (Italy). She is a Member of the Scientific Committee of the ABITA Centre and an Independent Expert for the European Community on the topics of bioecological architecture and innovative environmental technologies, with a focus on managing complex building processes and designing innovative envelope components. E-mail: rosa.romano@unifi.it

Eleonora Di Monte, Research Fellow at the University of Florence (Italy), holds a Master's Degree in Bioecological Architecture and Technological Innovation for the Environment from the ABITA Centre. Her research activities and professional practice focus on sustainability in architecture, energy efficiency of buildings, bioclimatics and dynamic energy simulation to evaluate design choices. E-mail: eleonora.dimonte@unifi.it



Il concetto di modularità contraddistingue l'architettura dalle sue origini ai giorni nostri e ne determina le caratteristiche compositive, estetiche e formali, creando una relazione biunivoca tra l'insieme e le sue parti, definibili per l'appunto come moduli e intese come sotto-unità aventi proprietà costruttive comuni, dimensioni uguali o multiple, e progettate per essere accostate con grande varietà e libertà allo scopo di adattarsi alle più diverse esigenze. Declinabile in infinite scale applicative, 'dal cucchiaino alla città' per dirla alla E. N. Rogers, la modularità riemerge con forza nell'era post-industriale e, in anni recenti, diventa paradigma implicito di sostenibilità, spesso associato ai temi della reversibilità, dell'adattabilità e della funzionalità.

Il modulo, in tal senso è identificabile sia con l'intero edificio, considerato parte fondamentale del metabolismo urbano delle città del futuro, sia come insieme energeticamente efficiente, costituito esso stesso da sotto unità modulari identificabili in elementi più o meno complessi e ulteriormente scomponibili in rapporto alle funzioni specifiche che essi devono svolgere. In entrambi i casi si tratta di sistemi aperti che devono avere un basso impatto ambientale, realizzabili attraverso processi di prefabbricazione, e spesso gestiti mediante strumenti digitali che permettono di monitorare le prestazioni del sistema lungo il suo intero ciclo di vita, ottimizzando le fasi di gestione, dismissione e riciclo (Kamali, Hewage and Sadiq, 2019; Grosso and Chiesa, 2014).

Il modulo diventa così l'unità elementare embrionale a cui possono essere ricondotte le proprietà intrinseche di materiali, sistemi tecnologici ed edilizi, e a cui si può far ricorso per realizzare edifici a diversi gradi di complessità. Negli ultimi anni, ad esempio, particolare attenzione è stata rivolta nella progettazione di unità abitative modulari utilizzabili per rispondere rapidamente alla domanda del settore edilizio legata sia alle nuove costruzioni sia agli interventi di riqualificazione e di ricostruzione post-emergenza (Bologna, 2018).

In questo contesto è interessante evidenziare come l'uso di elementi prefabbricati in legno abbia favorito nel tempo lo sviluppo di soluzioni tecnologiche modulari e facilmente assemblabili che sono diventate una costante costruttiva nei paesi occidentali (Ibañez, Gualart and Salka, 2022; Baiari and Altamura, 2019). È ormai noto infatti che l'uso del legno in architettura permette una considerevole riduzione dell'impatto ambientale degli edifici, recuperando nel bilancio energetico del manufatto edilizio l'anidride carbonica che l'albero ha assorbito durante la sua vita utile (Sathre and Gonzalez-Garcia, 2014; Sposito and Scalsi, 2019).

Il legno inoltre si presta più di altri materiali a essere utilizzato nel settore della prefabbricazione e della costruzione modulare, grazie alla sua lavorabilità (che consente di effettuare tagli e fresature off-site) e al suo peso specifico, che risulta essere inferiore a quello di altri materiali da costruzione, facilitando le fasi di trasporto e di messa in opera (Bhandari et alii, 2023). Non a caso, il balloon frame (brevettato nel 1833 da G. W. Show) e il platform frame possono considerarsi due tra i sistemi costruttivi modulari e assemblabili a secco che si sono diffusi per primi e con maggiore rapidità a scala globale.

Un edificio realizzato con il sistema platform frame è infatti formato da pareti e solai costituiti

da intelaiature di elementi modulari di piccola sezione (generalmente 4 x 9 o 5 x 10 cm) posti a interasse costante (40-60 cm), facilmente assemblabili con pannelli di tamponamento (compensato o OSB) e con strati di diverso spessore di materiale isolante. Le pareti e i solai così realizzati possono essere collegati fra loro e alle fondazioni con piastre metalliche angolari, tirafondi, viti e chiodi, garantendo buona stabilità meccanica e ottime prestazioni energetiche.

Grazie a queste peculiarità, negli ultimi anni, la tecnologia platform frame è stata oggetto di numerose sperimentazioni, a cui può essere ricondotta anche la ricerca nZEM sviluppata dal DIDA di UniFI insieme a un gruppo di quattro aziende toscane e finalizzata a realizzare un prototipo modulare abitativo a energia zero mediante l'utilizzo di processi e materiali innovativi. Nel dettaglio, l'articolo, partendo da una riflessione sullo stato dell'arte delle tipologie modulari abitative, descriverà l'approccio metodologico adottato nell'ambito della ricerca e presenterà alcuni dei risultati delle simulazioni condotte nella fase di validazione e prototipazione del modulo nZEM.

La ricerca nZEM | Finanziata dalla Regione Toscana nell'ambito del POR CREO FESR 2014-2020, la ricerca nZEM è stata sviluppata per rispondere in modo innovativo alle sfide lanciate dai programmi europei New European Bauhaus (European Commission, 2021) e Horizon Europe (European Commission, 2023), finalizzati a promuovere la transizione energetica nel settore dell'edilizia legata alla filiera del legno attraverso la sperimentazione e la collaborazione sinergica tra accademia e mondo industriale, con particolare attenzione ai temi del cambiamento climatico e della salute umana.

Il progetto di ricerca si inserisce, infatti, nel panorama internazionale degli studi scientifici che affrontano il tema dell'innovazione tecnologica, ricorrendo all'ibridazione di processo in un'ottica di sostenibilità ambientale (Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme, 2019, 2022). L'ambizione è realizzare unità abitative a energia zero, totalmente prefabbricate, facilmente trasportabili, assemblabili e reversibili che, grazie alla possibilità di customizzare gli elementi di chiusura esterna, si prestano a essere utilizzate in fasce geografiche con caratteristiche climatiche diverse.

Per questo motivo, l'approccio metodologico adottato, articolato in 4 Obiettivi Operativi (coincidenti con le fasi di lavoro della ricerca), promuove l'adozione di strumenti predittivi di controllo in tutti gli stadi del progetto e del processo realizzativo (Smith and Quale, 2017) e punta all'ottimizzazione delle prestazioni di tutti i sottocomponenti (elementi opachi e trasparenti di chiusura verticale e orizzontale, impianti per la produzione di RES e la gestione e il monitoraggio energetico) progettati come unità indipendenti per realizzare un modulo abitativo in platform frame, identificabile come il risultato finale del progetto.

L'idea alla base di nZEM è, infatti, quella di rendere il più efficiente possibile lo spazio compatto e minimo di un modulo adattabile e assemblabile per esigenze diverse, che variano dalla residenza per l'emergenza e il turismo (Radogna, 2018). Per questo motivo il prototipo nZEM è stato pensato

per rispondere ai requisiti di prefabbricabilità, trasportabilità, adattabilità, oltre che a quelli necessari a garantire un'elevata efficienza energetica e un basso impatto ambientale, attraverso il raggiungimento delle seguenti prestazioni: 1) riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di CO₂; 2) benessere e salute; 3) produzione di energia rinnovabile; 4) Controllo integrato delle prestazioni energetiche.

Per raggiungere quest'obiettivo nella prima fase della ricerca è stata condotta un'analisi approfondita dello stato dell'arte, finalizzata a individuare le caratteristiche funzionali, tecnologiche e ambientali da trasporre nel nuovo modulo abitativo, il cui progetto – sviluppato in sinergia con il gruppo di aziende coinvolte – ha previsto l'impiego di materiali innovativi (in particolare i pannelli isolanti riflettenti) simulati nella fase di design e testati in opera nella fase di prototipazione.

Prefabbricazione e modularità: dagli archetipi bioclimatici alle sperimentazioni contemporanee

L'analisi dello stato dell'arte, sviluppata nell'ambito dell'Obiettivo Operativo 1, ha evidenziato come in urbanistica, in architettura, nell'arredamento e nel disegno industriale sia il concetto di modularità che quello di prefabbricazione possono essere fatti risalire alla 'notte dei tempi'. Già le comunità nomadi primitive facevano uso di componenti edilizi modulari (spesso tronchi di legno e tessuti) che potevano essere montati e smontati per realizzare villaggi temporanei (Balducci and Camilli, 2022): ne sono un esempio le capanne aurignaziane, risalenti al paleolitico (Cascone, Russo and Tomasello, 2018) o le tende indiane dei pellerossa americani.

Con l'avvento della rivoluzione industriale la necessità di creare contesti abitativi salubri e funzionali in tempi ridotti ha portato alla sperimentazione di soluzioni tecnologiche assemblabili a secco più complesse, realizzate mediante l'utilizzo di componenti da costruzione standardizzati in acciaio o in legno, che si sono diffusi rapidamente a partire dal XX secolo. Tra le realizzazioni maggiormente interessanti di questo periodo non si possono dimenticare: la Copper House (1929) di W. Gropius, ampliabile in funzione delle esigenze della committenza grazie alla presenza di un particolare giunto perimetrale (Herbert, 1984); la Jacobs House (1929) di F. L. Wright, pensata per costare solo 5.000 dollari e realizzata in platform frame con pannelli trasportabili in cantiere completi degli elementi di finitura interna (Dahlin, 2015).

A partire dagli anni '40 e dopo il conflitto bellico si è assistito a un incremento delle sperimentazioni finalizzate a produrre unità abitative modulari, trasportabili e facilmente adattabili alle diverse morfologie dei luoghi di costruzione. Mentre in Italia il CNR bandiva un concorso per la realizzazione di baracche in legno destinate all'uso militare totalmente smontabili e trasportabili (in cui ogni sottocomponente era dotato di codice biunivoco di identificazione finalizzato a facilitarne il montaggio), negli Stati Uniti R. Buckminster Fuller progettava la Mechanical Wing (1940), un'abitazione modulare, integrata con bagno e cucina, realizzabile attraverso un processo di produzione industriale desunto dal settore automobilistico e trasportabile con un semplice auto-rimorchio (Gorman, 2005). Nel 1940 Le Corbusier realizzava Les Maisons Murondins, progettate per essere auto-

costruite facendo uso di materiali poveri, come il legno e la terra cruda, reperibili sul luogo di costruzione (Czub, Kizilkaya and Souilamas, 2017). L'unità base di questa tipologia era dimensionata secondo i principi dello spazio minimo necessario, con una larghezza di 3 metri e una lunghezza variabile tra 7, 8 e 10 metri, in cui le singole celle venivano poi giustapposte e, se necessario, unite sotto un unico tetto a doppia falda che si differenziava dalla classica tipologia a capanna attraverso uno sfalsamento di una delle due falde al fine di ottenere un'apertura su di un fronte che permettesse l'illuminazione degli spazi interni.

Tuttavia è nell'immediato secondo dopoguerra che, grazie alla ripresa economica e all'introduzione di importanti soluzioni tecnologiche, pensate proprio per accelerare i processi di prefabbricazione (come l'aggancio Packaged House System brevettato nel 1946 da C. Wachmann e W. Gropius), che i moduli abitativi preassemblati diventano tra le soluzioni più efficaci a sostenere la ricostruzione, influenzando nuove correnti progettuali attente a ridurre i tempi e i costi di produzione senza rinunciare al comfort e all'efficienza energetica. Sono questi gli anni nei quali negli Stati Uniti iniziano a proliferare aziende che forniscono kit per la 'costruzione fai da te' di unità abitative unifamiliari, comodamente ordinabili tramite un catalogo di componenti standardizzati (Knaack, Chung-Klatte and Hasselbach, 2012).

Alcune tra le sperimentazioni maggiormente interessanti di questi anni sono la casa pieghevole Acorn House (1945) di K. Koch, prodotta interamente in officina come un unico elemento costituito da parti mobili facilmente dispiegabili (Alter, 2022), e i prototipi abitativi di J. Prouvé, pensati come alloggi economici, confortevoli, funzionali e resistenti, tra i quali si ricordano: i moduli abitativi costituiti da elementi prefabbricati in legno commissionati dal Ministero per la Ricostruzione francese (1945) e pensati per ospitare persone rifugiate, profughi e senza tetto (Vitra Design Museum, 2007).

E ancora, le quattordici Maisons Industrielles (1950-52) a Meudon, montabili da sole quattro persone senza bisogno di alcun mezzo meccanico (Pelletier, 2012); la Maison Prouvé (1954), ideata come una struttura leggera e flessibile grazie all'assemblaggio di elementi standardizzati, articolati in pianta su principi puramente funzionali (Tapias Monné, 2013); la Maison des Jours Meilleurs realizzata nel 1954 a seguito dell'appello di A. Pierre per fornire alloggi di emergenza alle persone in difficoltà (Serafin, 2012); la Maison du Sahara (1958), moderno prototipo di casa villaggio per climi estremi, sviluppata attorno a un tetto in lamiera di alluminio che ricorda una tenda rigida sotto la quale si articola lo spazio domestico (Irace, 2020).

Negli anni '70 si assiste, anche grazie al contributo di R. Buckminster Fuller, alla diffusione di sistemi abitativi basati sul modello del container che consentono l'adozione di soluzioni tecnologiche estendibili, scomponibili e integrabili. Tra le sperimentazioni più interessanti del periodo non si può fare a meno di citare la Casa Mobile di Rossellini e Hosoe, creata in collaborazione con la FIAT per la mostra dal titolo Italy – The New Domestic Landscape tenuta al Museum of Modern Art di New York nel 1972: si tratta di un modulo con un'unità di base, contenuta in 10 mq, estensibile

grazie alla presenza di particolari pareti a soffietto fino alla dimensione massima di 28 mq (Rossellini, 1974).

Contemporaneamente vengono condotte nuove ricerche sul tema della ricostruzione post disastro, tra le quali si ricordano: la Tilted Box (1970) di K. Kurokawa (Sottosanti, 2018); la Mobile House di Zanuso e Sapper che nel 1971 sviluppano un prototipo abitativo autosufficiente (dotato di un sistema di recupero e scarico delle acque) trasportabile in un container di circa 6 metri (Irace, 2008); il Sistema Abitativo di Pronto Intervento (SAPI) e la sua versione abitativa MAPI che tra il 1982 e il 1984 vengono sviluppati da Pierluigi Spadolini (con G. Fagnoni e G. Spadolini) come moduli pluriuso di pronto intervento, totalmente attrezzati, prefabbricabili, recuperabili, agevolmente trasportabili e collocabili in qualsiasi sito (Canepa, 2017). E ancora, le sperimentazioni di Shigeru Ban tra cui le Paper Log Houses del 1995 e del 2001 (Jodidio, 2015), la Paper Emergency Shelters for UNHCR del 1999 (Latka, 2017) e la Container Temporary Housing del 2011 (Hikone and Tokubuchi, 2014); le residenze Elemental di A. Aravena realizzate con gli innovativi pannelli di tamponamento Tecnopanel (Aravena, 2012); le 5 tipologie abitative progettate nel 2007 da MVRDV per la ricostruzione post uragano Katrina a New Orleans, ispirate alla morfologia e alle caratteristiche tecnologiche delle shotgun houses e realizzate assemblando lungo l'asse orizzontale 3 moduli cubici di 3,5 metri di lato (Feireiss and Pitt, 2009).

In anni recenti la ricerca sulle unità abitative modulari si sposta verso il tema delle micro-houses nZEB, ordinabili da cataloghi multimediali online, facilmente personalizzabili e assemblabili dalla committenza per essere collocate in aree geografiche con climi diversi, non necessariamente servite da infrastrutture e servizi. Tra gli esempi più noti sono da citare: la WikiHouse¹, brevettata nel 2011 dagli architetti A. Parvin e N. Ierodiaco-nou come un sistema costruttivo open source, il cui progetto esecutivo può essere scaricato da un sito internet dedicato così da facilitarne la realizzazione attraverso processi di autocostruzione; il prototipo abitativo BiosPHera 2.0, ideato nel 2012 da ZEPHIR per essere totalmente indipendente dal punto di vista energetico (Pepe, 2016); la LEAP Home a firma della torinese LeapFactory, sviluppata nel 2015 come un kit di elementi modulari assemblabili in configurazioni diverse e attrezzabili con le più moderne tecnologie impiantistiche (Scalco, 2020).

E ancora, la WikkellHouse progettata nel 2017 da Fiction Factory come un sistema modulare caratterizzato da una scocca metallica attorno alla quale viene avvolto cartone a 24 strati, assemblabile in 24 ore e la cui durata è garantita per mezzo secolo (Vinci, 2018); la M.A.D.I. Home, creata nel 2017 da R. Vidal Mezzovico come un modulo abitativo base di due piani realizzato con pannelli dispiegabili (caratteristica questa che la rende facilmente trasportabile con mezzi carrabili ordinari) e personalizzabile con elementi di finitura e arredi scelti rispetto alle esigenze della committenza (Borgobello, 2017); le case prefabbricate Minimal (2021) dello studio spagnolo Metro 7, ispirate dal modello passivhaus e costituite da sotto-unità modulari facilmente assemblabili e utilizzabili anche in progetti di sopraelevazione o ampliamento di edifici esistenti (Escartín, 2023).

Infine è importante notare come il tema dell'abitazione temporanea e dei sistemi abitativi modulari abbia richiamato, anche nell'ultimo secolo, l'attenzione di architetti di fama internazionale tra i quali si ricordano Renzo Piano, con il prototipo Diogene (2009) di casa minima (2,40 x 2,96 m) in legno realizzata nel 2013 in collaborazione con Matthias Schuler e Maurizio Milan per il Vitra Campus (Di Marzo, 2013) e Richard Rogers, che nel 2015 realizza la Prouve House (Winston, 2015) e negli anni successivi brevetta degli innovativi moduli abitativi prefabbricati in platform frame, 'plug and play', assemblabili in cantiere e utilizzati per costruire nel 2015 il quartiere di edilizia sociale Y:Cube (Wainwright, 2015) e nel 2017 il complesso di abitazione temporanee PLACE / Ladywell (Harris, Brickell and Nowicki, 2019) a Londra.

E ancora, lo Studio danese BIG, che nel 2019 propone il modello abitativo delle Beach Huts per la costruzione di 21 piccoli alloggi residenziali (21 mq) realizzati in platform frame e rivestiti in legno bruciato (Hofmeister, 2022), e Norman Foster che, in occasione della Biennale di Architettura di Venezia del 2023, ha presentato il prototipo di una tiny dwelling realizzata con un innovativo involucro portante, costituito da un doppio strato di tessuto avvolgibile che impregnato di cemento low-carbon e posato su casseforme leggere si solidifica in 24 ore (Benetti, 2013).

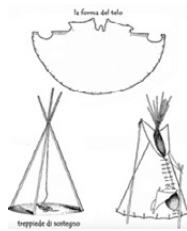
Le realizzazioni descritte hanno contribuito all'analisi dell'evoluzione dei processi di progettazione e costruzione di sistemi abitativi modulari condotta nella fase preliminare del progetto nZEM e sono state restituite in un quadro sinottico (Fig. 1) dello stato dell'arte dal quale sono emerse alcune ricorrenze interessanti utilizzate nella fase propositiva per sviluppare il progetto del prototipo abitativo oggetto della ricerca. L'exkursus storico evidenzia come la progettazione e la realizzazione di questa tipologia edilizia sia stata da sempre ispirata dalla necessità di dare risposta in tempi celeri, e con costi contenuti, all'emergenza abitativa senza tuttavia rinunciare a condizioni di comfort indoor basilari.

Tutti gli esempi scelti come caso studio: sono stati realizzati assemblando unità modulari elementari o kit di componenti standardizzati; risultano integrati con arredi e impianti; sono sviluppati facendo ricorso a processi costruttivi ispirati dal settore industriale dell'automotiv e del design di interni, gestibili attraverso la creazione di modelli virtuali adattabili alle esigenze della committenza; possono essere facilmente trasportati sul luogo di costruzione e assemblati senza ricorrere a manodopera specializzata; prediligono il ricorso a sottostrutture prefabbricate, che risultano leggere e facilmente integrabili con materiali isolanti e di finitura in grado di garantire durabilità e prestazioni meccaniche e termiche adeguate; presentano una distribuzione planimetrica lineare, nella quale l'ingresso è posto sul lato corto del prefabbricato mentre le aperture dei vari ambienti sul lato lungo.

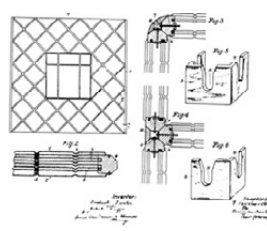
Inoltre è evidente come nel tempo l'attenzione dei progettisti si sia spostata dall'adozione di soluzioni tecnologiche di tipo analogico verso lo sviluppo di sistemi gestibili da strumenti digitali che, attraverso l'innovazione di prodotto e di processo, permettessero di accelerare i processi di prefabbricazione e assemblaggio, dando spazio alle sperimentazioni ispirate dalle transizioni digitale ed ecologica e finalizzate a migliorare la qualità dell'am-



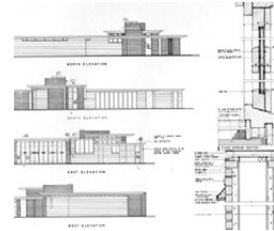
1) Prehistoric Hut (10.000 b. C.)



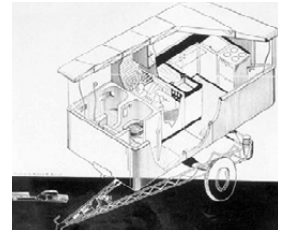
2) Red Indian Tent (1800)



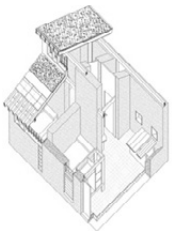
3) Copper House by W. Gropius (1929)



4) Jacobs House by F. L. Wright (1929)



5) Mechanical Wing by R. Buckminster Fuller (1940)



6) Les Maisons Murondins by Le Corbusier (1940)



7) Acorn House by K. Koch (1945)



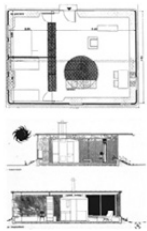
8) Packaged House System by C. Wachsmann and W. Gropius (1946)



9) Maisons Industrialisées by J. Prouvé (1950-1952)



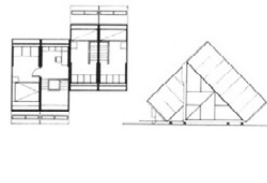
10) Maison Prouvé by J. Prouvé (1954)



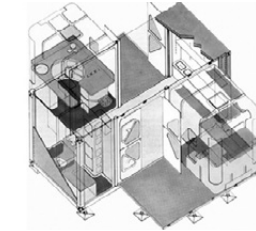
11) Maison des Jours Meilleurs by J. Prouvé (1954)



12) Maison du Sahara by J. Prouvé (1958)



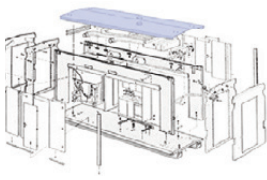
13) Tilted Box by K. Kurokawa (1970)



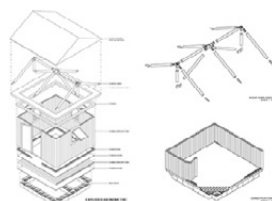
14) Mobile House by M. Zanuso and R. Sapper (1971)



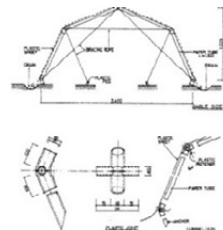
15) Casa Mobile by A. Rossellini and I. Hosoe (1972)



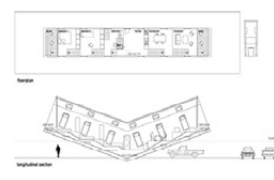
16) Sistema Abitativo di Pronto Intervento by P. Spadolini (1982)



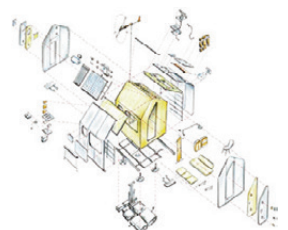
17) Paper Log Houses by S. Ban (1995)



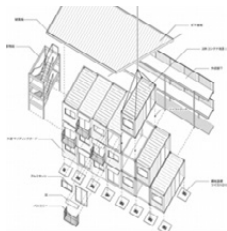
18) Paper Emergency Shelters by S. Ban (1999)



19) Shotgun House by MVRDV (2007)



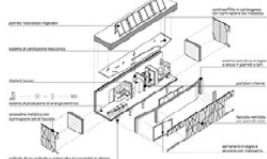
20) Diogene by R. Piano (2009)



21) Container Temporary Housing by S. Ban (2011)



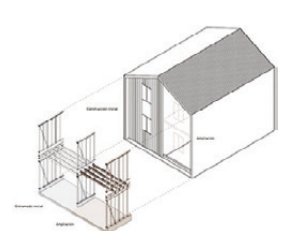
22) WikiHouse by A. Parvin and N. Ierodiaconou (2011)



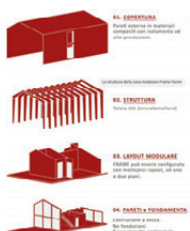
23) BiosPHERa 2.0 by ZEPHIR (2012)



24) Prouvé House by R. Rogers (2013)



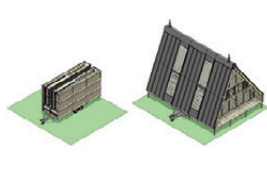
25) Elemental Houses by A. Aravena (2014)



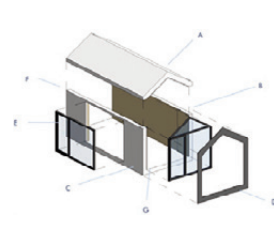
26) LEAP Home by LeapFactory (2015)



27) WikkelHouse by Fiction Factory (2017)



28) M.A.D.I. Home by R. Vidal (2017)



29) Minimal House by Metro 7 (2021)



30) Tiny Dwelling by N. Foster (2023)

Fig. 1 | Synoptic summary table of the case studies analysed in the preliminary phase of the research nZEM (credit: R. Romano 2023).

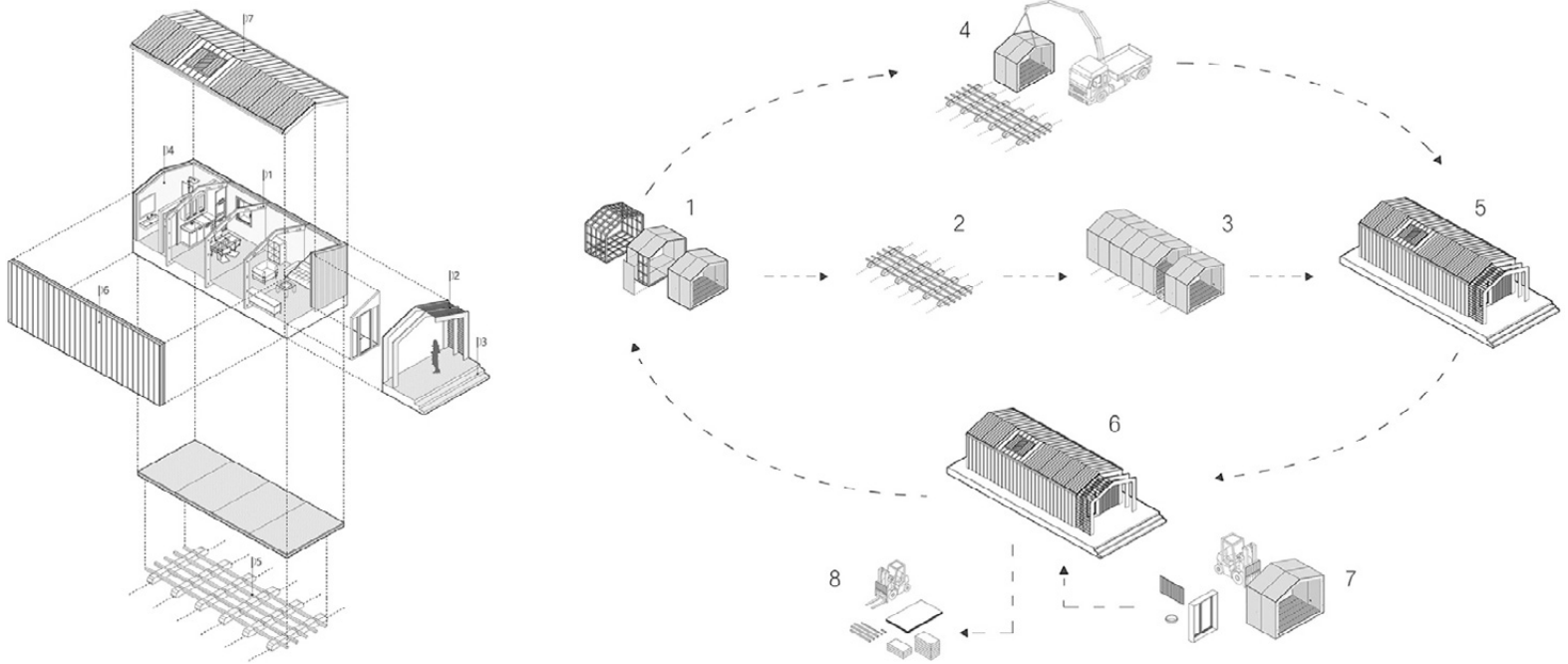


Fig. 2 | Analysis of the modular sub-components that make up the nZEM housing unit: 1) Connections between platform frame building components; 2) Solar shielding; 3) Vertical connections; 4) Module with plant cell; 5) Ground connection; 6) Vertical closures; 7) Roof elements (credit: L. Bernini, 2023).

Fig. 3 | Outline of the assembly and commissioning stages of the nZEM prototype: 1) Fabrication of components and assembly of elementary units at the factory; 2) Laying of foundations made of precast reinforced concrete blocks; 3) Assembly of elementary units at the construction site; 4) Transportation and commissioning of elementary units; 5) Assembled nZEM housing unit; 6) The finished housing system can easily be expanded and managed over time; 7) Commissioning of precast components for expansions and/or replacements; 8) Commissioning of new elementary units for expansions and/or replacements (credit: L. Bernini, 2023).

biente costruito in un'ottica di sostenibilità, salvaguardia delle risorse, ottimizzazione prestazionale e personalizzazione (Pone, 2022).

Il modulo abitativo nZEM | Ispirandosi agli esempi esaminati nella fase di analisi dello stato dell'arte, l'unità abitativa nZEM (32,00 mq) è stata progettata per essere realizzata affiancando orizzontalmente 4 moduli base (di 8,00 mq ciascuno, uno dei quali è destinato a ospitare una cella impiantistica) costruiti assemblando materiali a basso impatto ambientale (legno, isolanti in lana di roccia, ecc.) e innovativi (isolante riflettente, pannelli fotovoltaici, ecc.) in componenti di involucro opaco realizzati in platform frame e integrati con elementi trasparenti ad alte prestazioni e tecnologie per la produzione di energia rinnovabile (Fig. 2). Nel dettaglio il sistema costruttivo scelto presenta le caratteristiche elencate di seguito.

Le chiusure verticali opache sono realizzate assemblando i seguenti materiali dall'esterno verso l'interno: rivestimento in doghe di alluminio di 0,4 cm; intercapedine ventilata di 4 cm; pannello in cemento legno di 2,2 cm; pannello in fibra di legno di 10 cm; pannello OSB di 1,5 cm; pannello di isolante riflettente di 4 cm; camera d'aria di 7 cm; pannello in cemento legno 2,2 cm con rasatura esterna in intonaco bianco (U: 0,18 W/mqK; Y: 0,05 W/mqK).

La chiusura orizzontale superiore opaca è costituita da due falde inclinate con la seguente stratigrafia dall'esterno verso l'interno: rivestimento in doghe di alluminio di 0,4 cm; intercapedine ventilata di 4 cm; pannello in cemento legno di 2,2 cm; pannello in fibra di legno di 10 cm; pannello OSB di 1,5 cm; pannello di isolante riflettente di 4 cm; camera d'aria di 2,5 cm; pannello in cemento legno 2,2 cm con rasatura esterna in intonaco bianco (U: 0,18 W/mqK; Y: 0,05 W/mqK).

La chiusura orizzontale inferiore è progettata come un solaio sopraelevato che poggia su travi lamellari ancorate al terreno e presenta la seguente stratigrafia dal basso verso l'alto: lastra di cemento rinforzato Aquapanel di 1,3 cm; pannello isolante in vetro cellulare di 10 cm; pannello OSB di 1,5 cm; pannello isolante in vetro cellulare di 5 cm; lastra in gessofibra con fresatura per tubi pavimento radiante di 2,5 cm; tappetino termo-conduttivo di 0,2 cm; pavimento in legno flottante di 1 cm (U: 0,21 W/mqK; Y: 0,10 W/mqK).

Le chiusure verticali trasparenti sono realizzate con infissi in alluminio a taglio termico e doppio vetro basso emissivo con una trasmittanza U_w pari a 1,2 W/mqK, mentre quella superiore è realizzata con infissi in alluminio a taglio termico e tripla partizione tamponata al centro con doppio vetro basso emissivo e ai lati con innovativi pannelli fotovoltaici integrati da tubi di rame per la produzione dell'acqua calda sanitaria (U_w : 1,2 W/mqK).

Seguendo il modello di alcuni degli esempi studiati, il modulo base nZEM è stato concepito per essere totalmente prefabbricato in officina rispetto a due opzioni volumetriche (mono o doppia falda) con dimensioni pari a 410 cm di larghezza, 240 cm di profondità e 350 cm di altezza. Dimensioni e peso (5.000 Kg) sono stati calibrati rispetto alla necessità di trasportare facilmente uno o più moduli sul luogo di costruzione senza far ricorso a mezzi straordinari (Fig. 3). Assemblando i moduli base attraverso connessioni hold-down è possibile generare spazi e layout insediativi sempre diversi, personalizzabili in relazione alle esigenze degli utenti e alle caratteristiche climatiche del luogo, senza variare le prestazioni energetiche e strutturali generali. Il ricorso a soluzioni assemblate a secco garantisce la totale reversibilità delle sotto-unità elementari e il conseguente riciclo di tutti i materiali utilizzati.

Come precedentemente ricordato la scelta di realizzare un'unità abitativa modulare e personalizzabile ha determinato la necessità di controllare tutte le fasi di progettazione attraverso la costruzione di un modello BIM, gestito mediante il software Autodesk REVIT, attraverso la realizzazione di famiglie parametriche 3D contenenti le informazioni tecniche, fisiche ed economiche di ciascuno dei materiali e dei componenti utilizzati. Al fine di rendere il processo in linea con i principi previsti dalla mass customization, all'interno del modello Revit, ogni famiglia-modulo può essere integrata con elementi o sistemi compatibili, analizzando in tempo reale come variano i consumi energetici, i costi, l'impatto ambientale, ecc. al variare delle scelte progettuali.

Inoltre, con l'idea di creare un configuratore accessibile anche a utenti esterni, è stata elaborata una scheda prodotto che permette di configurare in modo variabile sia il modulo base sia l'unità abitativa in relazione al luogo di costruzione. La scheda contiene campi precompilati e permette di scegliere tra alcune opzioni preimpostate e pensate per garantire il raggiungimento delle prestazioni energetiche e ambientali previste dalla normativa italiana. Il modulo base, ad esempio, può essere realizzato secondo due tipologie, classico a doppia falda o mono-falda; in aggiunta è possibile scegliere quale tipo di pacchetto stratigrafico è più idoneo alla condizione climatica d'insediamento cambiando la tipologia di isolamento e di rivestimento esterno. Inoltre, all'interno del modello Revit, ogni famiglia-modulo può essere integrata con elementi o sistemi compatibili quali finestre, porte, abbaini, impianto fotovoltaico, ecc. (Fig. 4).

L'interoperabilità del configuratore consente all'utente finale, tramite l'esportazione di file in formato .ifc, di utilizzare, in prima battuta, il software

Termus BIM di ACCA per valutare le prestazioni termoigrometriche degli elementi di involucro scelti e determinare la classe energetica raggiungibile sulla base delle scelte volumetriche e tecnologiche adottate. Infine, il modello generato dal configuratore può essere esportato su altri software gratuiti dedicati alle simulazioni di Daylight per calcolare in tempo reale anche il fattore medio di luce diurna, scegliendo di conseguenza il corretto posizionamento degli elementi trasparenti.

Simulazioni energetiche e validazione del sistema tecnologico | Parallelamente alla modellazione con il software REVIT, la validazione del progetto è stata condotta attraverso il ricorso a simulazioni energetiche condotte a regime dinamico e sviluppate con il software Energy Plus, con l'obiettivo di verificare il comportamento termo-fisico dell'unità abitativa elementare durante tutto l'arco dell'anno, controllando le numerose variabili presenti nel sistema edificio-impianto progettato e facendo una stima precisa dei consumi e delle prestazioni. L'obiettivo era supportare le scelte progettuali e analizzare il comportamento energetico-ambientale del modulo rispetto a tre condizioni climatiche (clima temperato, caldo e freddo) caratterizzanti il territorio italiano, così da supportare in modo adeguato sia la fase di prototipazione che quella di diffusione dei risultati. È stato quindi deciso di simulare il modulo abitativo base rispetto a 18 configurazioni (Fig. 5) scaturite dall'incrocio dei seguenti parametri: 1) localizzazione geografica e tipo di clima; 2) orientamento del modulo rispetto all'asse longitudinale; 3) stratigrafie di involucro, confrontando le prestazioni termoigrometriche della soluzione tecnologica abitualmente utilizzata da LAM (EPS e lana minerale), rispetto a una soluzione coibentata con isolante riflettente e fibre di legno (Fig. 6).

Le simulazioni sono state condotte dividendo l'unità abitativa elementare in 2 zone termiche, soggiorno / cucina e bagno. Per entrambe è stato ipotizzato un ricambio d'aria pari a 0,5 vol/h, incrementato a 4 vol/h per i mesi estivi nelle località di Firenze e Palermo, dove si suppone che nelle ore notturne delle giornate più calde vengano aperte le finestre per smaltire il calore accumulato. Inoltre, con l'obiettivo di valutare i parametri di comfort indoor secondo il modello di Fanger (PMV e PPD), è stato assunto che la zona 1 fosse abitata durante tutto l'arco dell'anno da un'unica persona, con un carico di calore (sensibile e latente) pari a 150 W/persona per le ore diurne e di 100 W/persona per le ore notturne, con un valore metabolico per utente pari a 0,1, creando un calendario annuale dei parametri di resistenza termica del vestiario (clo): la velocità dell'aria in tutti gli ambienti è stata impostata pari a 0,2 m/s.

La simulazione ha poi tenuto conto della presenza dei corpi illuminanti, inserendo i dati relativi alle potenze elettriche installate (pari a 15 W/mq) e individuando i profili di accensione sulla base dei livelli di occupazione delle due zone termiche. Per le apparecchiature elettriche è stata, invece, ipotizzata la presenza nella zona 1 di un frigorifero da 200 W, di un forno a microonde da 900 W e di un piano a induzione da 6.000 W, per una potenza complessiva di 7.100 W e secondo un profilo di utilizzo impostato su fascia oraria. Al fine di stimare il fabbisogno di energia necessario a mantenere la temperatura interna nel range di comfort

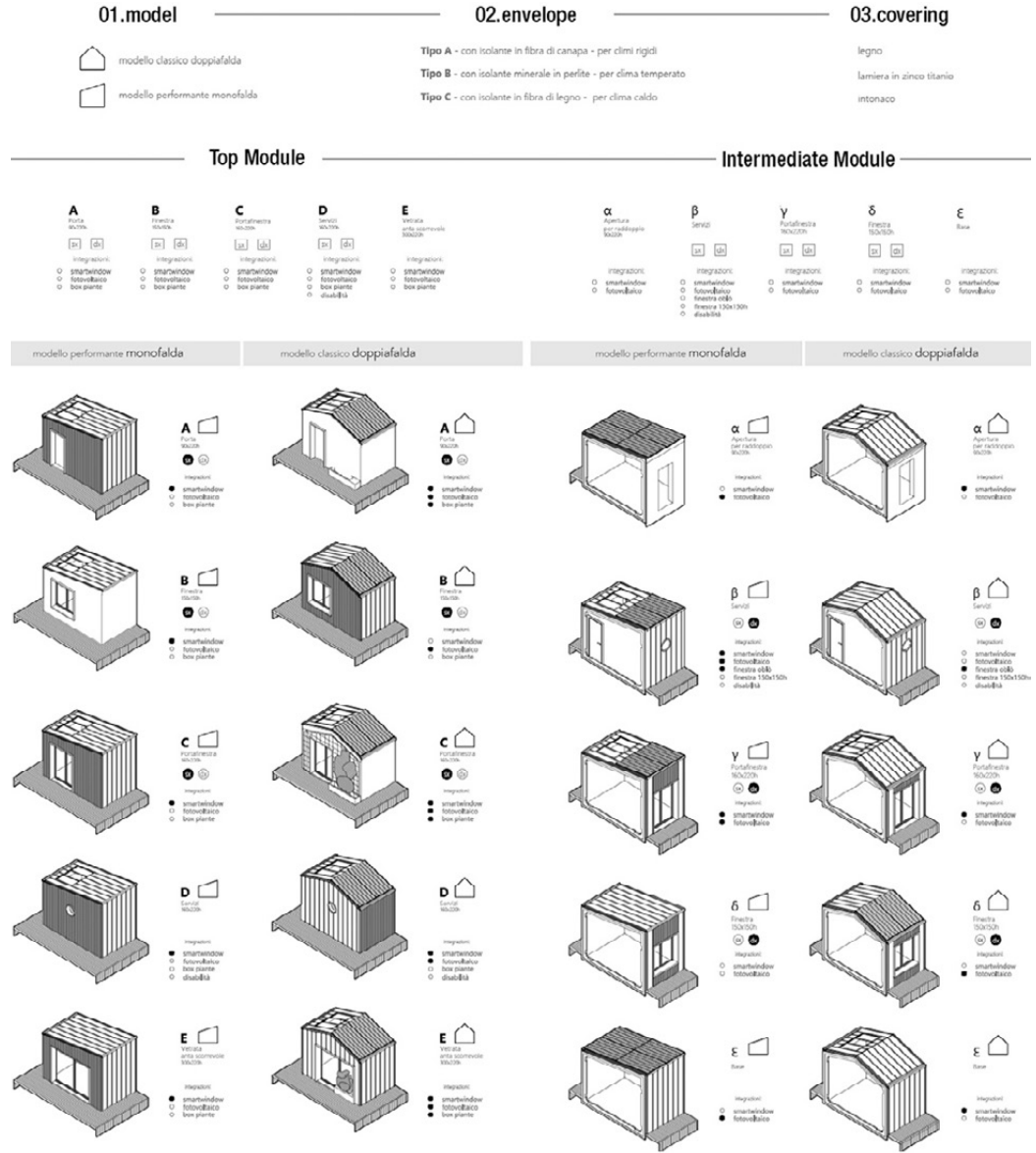


Fig. 4 | Diagram of the customisations that can be made on the base module with the nZEM configurator (credit: L. Bernini, 2023)

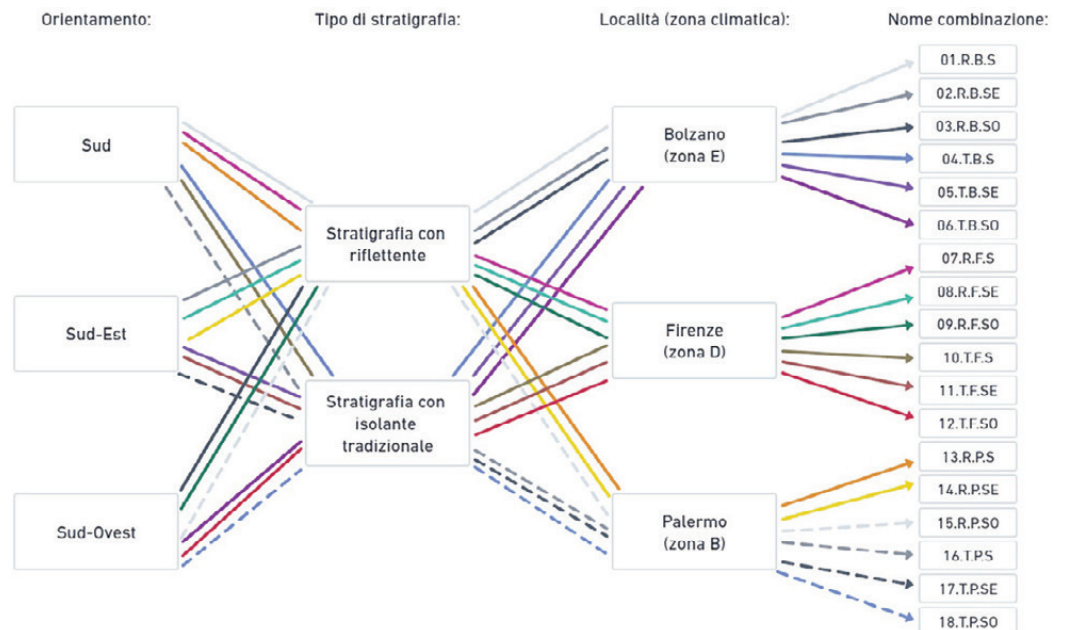


Fig. 5 | Schematic of the 18 configurations analysed with the dynamic regime simulations (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

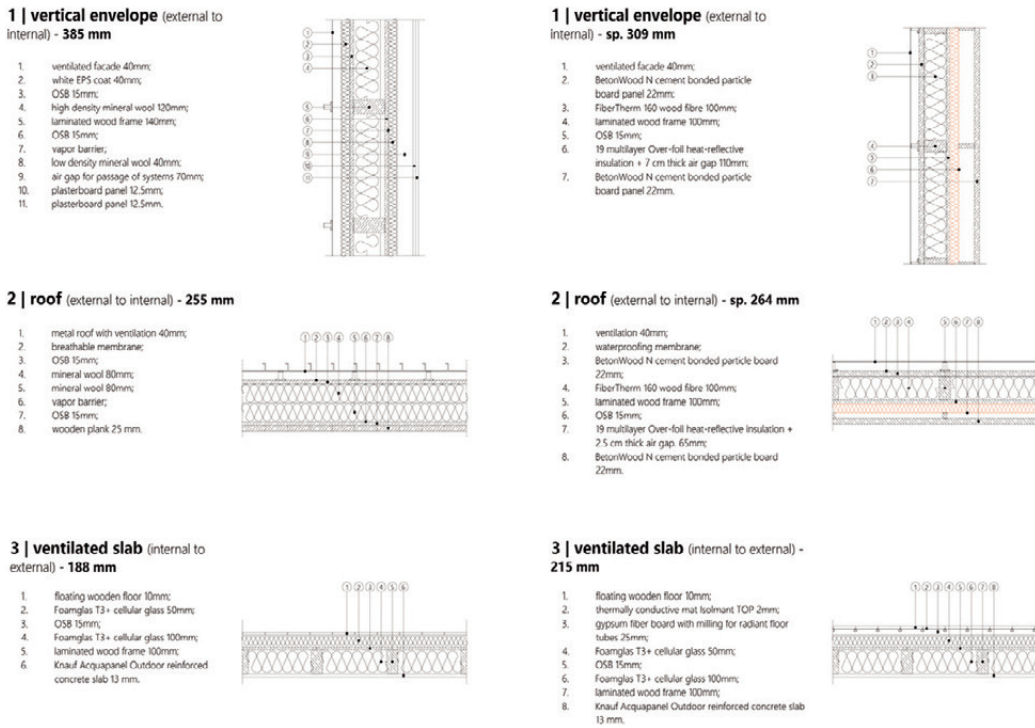


Fig. 6 | Comparison of the two stratigraphies analysed with dynamic simulations: LAM stratigraphy with traditional insulation; nZEM stratigraphy with reflective insulation (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

durante tutto l'arco dell'anno è stato modellato un impianto ideale, pensato come un sistema HVAC per riscaldamento e raffrescamento, integrato da un termostato a due livelli limite, uno per l'inverno (pari a 20 °C) e uno per l'estate (pari a 26 °C). Infine, con l'obiettivo di analizzare nel calcolo generale il contributo delle tecnologie integrate per produrre energia rinnovabile, il modello è stato implementato inserendo nelle falde di copertura un impianto fotovoltaico in silicio monocristallino di 3,4 kWp.

Risultati delle simulazioni | Le simulazioni a regime dinamico condotte per il modello abitativo modulare prima descritto hanno permesso di ottenere i seguenti risultati:

- in relazione alla scelta del migliore orientamento del modulo nelle tre località geografiche, si evidenzia come l'orientamento non incida in modo rilevante sull'andamento delle temperature interne (Fig. 7);
- per quanto riguarda il confronto delle prestazioni raggiungibili utilizzando le due stratigrafie di involucro si riscontra, in tutte le località geografiche e rispetto a tutti gli orientamenti, che con la soluzione di chiusura nZEM, contenente l'isolante riflettente, la temperatura interna di entrambe le zone termiche ha un'oscillazione minore rispetto alla soluzione LAM, sia in inverno che in estate; pertanto, la chiusura nZEM risente meno della variazione della temperatura esterna (Fig. 8);
- nella comparazione tra la temperatura superficiale interna ed esterna del solaio di copertura, si riscontra che la stratigrafia nZEM permette di ridurre la trasmissione di calore tra l'ambiente esterno e quello interno, con differenze delle temperature superficiali dei due layer di chiusura (interno ed esterno) che, in estate, nella località di Palermo possono raggiungere anche i 40 °C (Fig. 9);
- rispetto all'efficacia di installare schermature mobili all'esterno delle chiusure trasparenti (attivabili

in modo automatico quando la radiazione solare incidente sulle finestre raggiunge i 100 W/mq), le simulazioni hanno dimostrato che in tutte le configurazioni modellate, questa soluzione permette di ridurre i carichi termici nei mesi estivi senza limitare i contributi solari passivi nei mesi invernali (Fig. 10);

- nel confronto tra il fabbisogno annuale per riscaldamento (Fig. 11) si evidenzia, in generale, come il modulo abitativo abbia delle prestazioni migliori a Palermo (con consumi stimati intorno ai 30 kWh) rispetto a Firenze (1.200 kWh) e Bolzano (580 kWh);
- analizzando quanto avviene, invece, rispetto al fabbisogno annuale per raffrescamento (espresso in kWh) si evince che seppur ci siano differenze sostanziali tra le tre località (con un minor fabbisogno a Bolzano dove le temperature sono in generale più basse nei mesi estivi rispetto a quelle di Firenze e Palermo), la stratigrafia nZEM con isolante riflettente permette in tutte e tre le località e per ciascun orientamento di ridurre i consumi globali (Fig. 12);
- rispetto all'analisi dei valori di PMV mediati sull'intero anno, con e senza l'impianto di climatizzazione attivo, le analisi predittive (Fig. 13) dimostrano come utilizzando entrambe le stratigrafie di involucro, se per la località di Bolzano la sensazione di comfort rimane pressoché invariata sia con che senza impianto (attestandosi al limite inferiore del range di comfort pari a -0,5), per la località di Palermo è evidente come senza impianto non si riescano a garantire condizioni di comfort adeguate (raggiungendo un valore di 1: leggermente caldo).

Conclusioni | La ricerca nZEM si inserisce nel novero delle sperimentazioni in atto nel panorama internazionale in termini di progettazione e realizzazione di sistemi abitativi a basso impatto ambientale per rispondere sia a situazioni di emergenza

determinate da calamità naturali sia alla necessità di realizzare abitazioni confortevoli in tempi brevi e a costi ridotti. In questo contesto di indagine il tema della modularità e della scalabilità dei sistemi costruttivi diventa cruciale per trovare e sviluppare proposte innovative suggerite dall'adozione di soluzioni tecnologiche di prodotto e di processo che permettano di ottimizzare e controllare tutte le fasi realizzative secondo un approccio sistemico di matrice Life Cycle Assessment.

Per rispondere a questa esigenza la progettazione del modulo abitativo nZEM è stata supportata dalla creazione di un modello BIM e di un configuratore digitale che hanno permesso di controllare le prestazioni raggiungibili assemblando in modo variegato le unità elementari e i sottocomponenti che costituiscono il sistema costruttivo. La fase di simulazione energetica ha permesso di testare le prestazioni termoisometriche della stratigrafia di involucro proposta, caratterizzata dall'utilizzo di pannelli di isolante riflettente scelti per ridurre lo spessore dei sistemi di chiusura, contribuendo alle ricerche internazionali in corso per la validazione di questo innovativo materiale isolante.

Purtroppo non è stato possibile condurre un'analisi puntuale dell'impatto ambientale del modulo abitativo, studiando con attenzione le fasi di approvvigionamento dei materiali e delle filiere di produzione, assemblaggio e dismissione dei componenti utilizzati. In attesa di reperire le risorse per condurre questi necessari approfondimenti e avviare il processo di brevettazione del modulo base e dei suoi sottocomponenti, nei prossimi mesi il prototipo, attualmente in costruzione (Fig. 14), sarà monitorato in ambiente reale per valutare se le prestazioni desunte dalla fase di simulazione siano realmente raggiungibili.

In ogni caso i risultati raggiunti supportano la metodologia adottata, che già in questa fase della ricerca può considerarsi efficace nel promuovere un processo di trasferimento della conoscenza tra il settore accademico e quello industriale, supportando l'innovazione tecnologica di processo e di prodotto nel settore della prefabbricazione e della produzione di unità abitative modulari, in linea con i precetti del Reversible Building Design (Durmisevic, 2018) e del Circular Economy Action Plan emanato dall'Unione Europea nel 2020 (European Commission and Directorate-General for Communication, 2020).

The concept of modularity has characterised architecture from its origins to the present day, influencing its compositional, aesthetic, and formal features. It establishes a biunivocal relationship between the whole and its parts, defined as modules-subunits with common construction properties, equal or multiple dimensions, designed to be combined with great variety and freedom to adapt to diverse needs. Applicable at various scales, "from the spoon to the city" in the words of E. N. Rogers, modularity resurges strongly in the post-industrial era and, in recent years, becomes an implicit paradigm of sustainability, often associated with reversibility, adaptability, and functionality. In this context, the living module can be identified both with the entire building, considered a fundamental part of the urban metabolism of future cities, and as an energetically efficient assembly itself,

consisting of modular subunits identifiable as more or less complex elements. These elements can be further decomposed based on their specific functions. In both cases, these are open systems designed to have a low environmental impact, achievable through prefabrication processes and often managed through digital tools that monitor the system's performance throughout its life cycle. This optimisation extends to the management, decommissioning, and recycling phases (Kamali, Hewage and Sadiq, 2019; Grosso and Chiesa, 2014). Furthermore, the living module thus becomes the embryonic elementary unit to which the intrinsic properties of materials, technological and building systems can be traced, and which can be used to create buildings of varying degrees of complexity. In recent years, for example, particular attention has been paid to the design of modular housing units that can be used to quickly respond to the demand from the building sector related to both new construction and post-emergency redevelopment and reconstruction (Bologna, 2018).

In this context, it is interesting to highlight how the use of prefabricated wood elements has, over time, facilitated the development of modular and easily assembled technological solutions that have become a consistent construction method in Western countries (Ibañez, Guallart and Salka, 2022; Baiani and Altamura, 2019). It is now known that the use of wood in architecture makes it possible to reduce the environmental impact of buildings considerably, reclaiming the carbon dioxide absorbed by trees during their lifespan in the energy balance of the building (Sathre and González-García, 2014; Sposito and Scalisi, 2019).

In addition, wood is more suitable than other materials for use in prefabrication and modular construction because of its workability (which allows for off-site cutting and milling) and its specific weight, which is lower than that of other construction materials, facilitating transportation and construction (Bhandari et alii, 2023). Not surprisingly, the balloon frame (patented in 1833 by G. W. Show) and the platform frame can be considered two of the modular, dry-assembly building systems that spread first and most rapidly on a global scale.

A building constructed with the platform frame system is made up of walls and floors consisting of frameworks of small-section modular elements (usually 4 x 9 or 5 x 10 cm) placed at constant spacing (40-60 cm), easily assembled with infill panels (plywood or OSB) and with layers of different thicknesses of insulation material. Walls and floors made in this way can be connected to each other and foundations with angle metal plates, anchor bolts, screws and nails, ensuring good mechanical stability and excellent energy performance.

Thanks to these peculiarities, in recent years, platform frame technology has been the subject of numerous scientific projects, to which the nZEM research developed by the DIDA of UniFI in collaboration with a group of four Tuscan companies can also be traced and aimed at creating a zero-energy modular housing prototype through the use of innovative processes and materials. In detail, the paper, starting with a short description of the state of the art of modular housing typologies, will describe the methodological approach adopted in the research and present some of the results of the simulations conducted in the validation and prototyping phase of the nZEM module.

The nZEM Research | Funded by the Tuscany Region under the POR CREO FESR 2014-2020, the nZEM research was developed to innovatively address the challenges posed by the European programs New European Bauhaus (European Commission, 2021) and Horizon Europe (European Commission, 2023). These programs aim to promote energy transition in the construction sector through experimentation and synergistic collaboration between academia and the industrial sector, with a particular focus on climate change and human health.

Indeed, the research project is part of the international panorama of scientific studies that address the issue of technological innovation, resorting to process hybridisation with a view to environmental sustainability (Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme, 2019, 2022). The ambition is to create zero-energy, prefabricated, easily transportable, assembled and reversible housing units that, thanks to the

possibility of customising the external closure elements, lend themselves to use in geographic area belts with different climatic characteristics.

For this reason, the methodological approach adopted is divided into 4 Operational Objectives (coinciding with the work phases of the research), promoting the adoption of predictive control tools at all stages of the design and implementation process (Smith and Quale, 2017) and aiming at optimising the performance of all subcomponents (opaque and transparent vertical and horizontal closure elements, RES production facilities, and energy management and monitoring) designed as independent units to realise a platform frame housing module, identifiable as the outcome of the project. The idea behind nZEM is to make the compact and minimal space of a living module as efficient as possible that can be adapted and assembled for different needs, ranging from residence to emergency and tourism (Radogna, 2018). For this reason, the nZEM prototype has been designed to meet the requirements of prefabrication, trans-

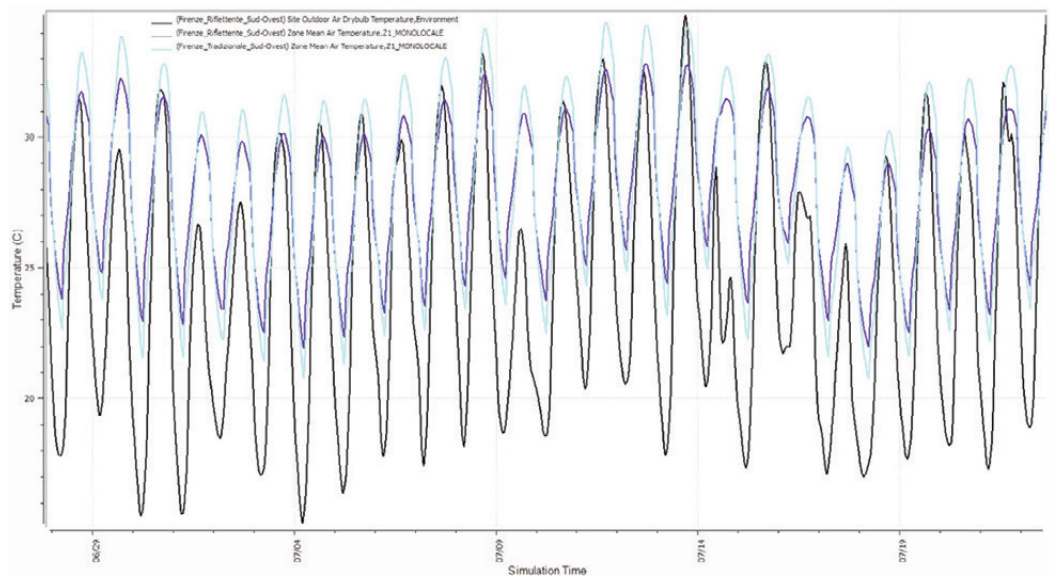
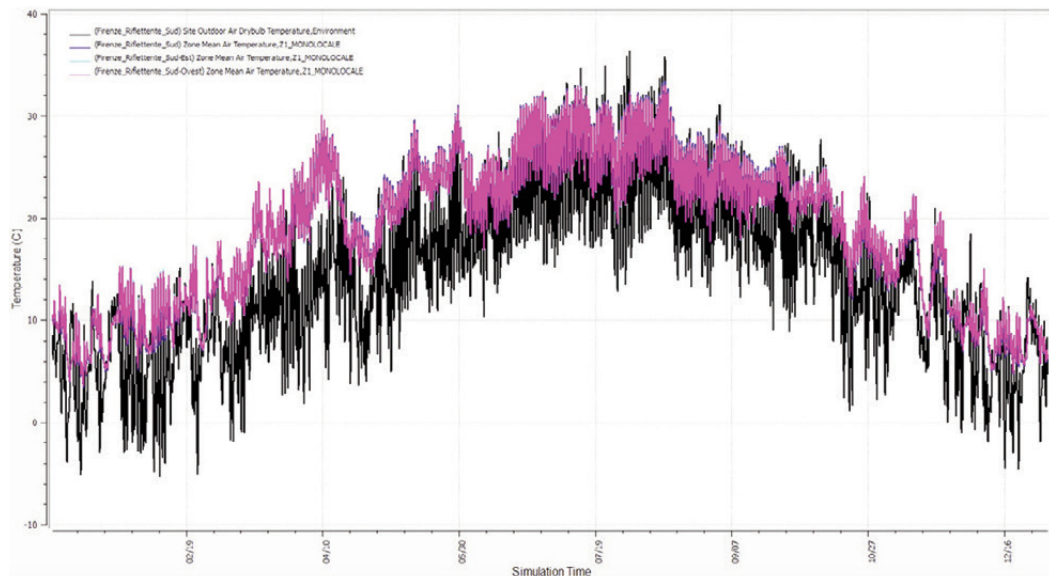


Fig. 7 | Analysis of indoor temperatures with respect to the three orientations chosen at the Florence location (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

Fig. 8 | Analysis of the oscillation of indoor temperatures at the Florence location (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

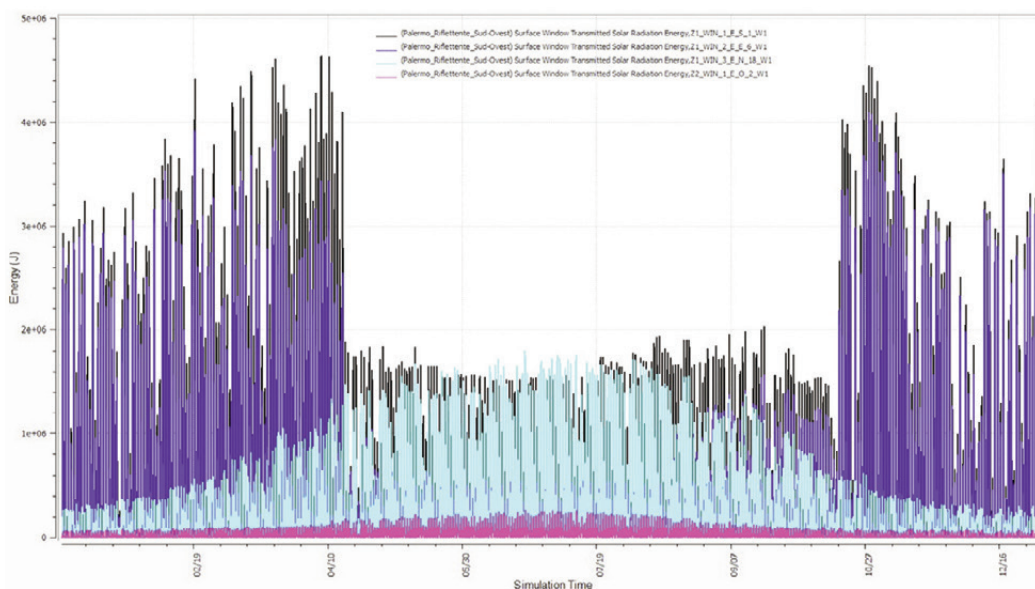
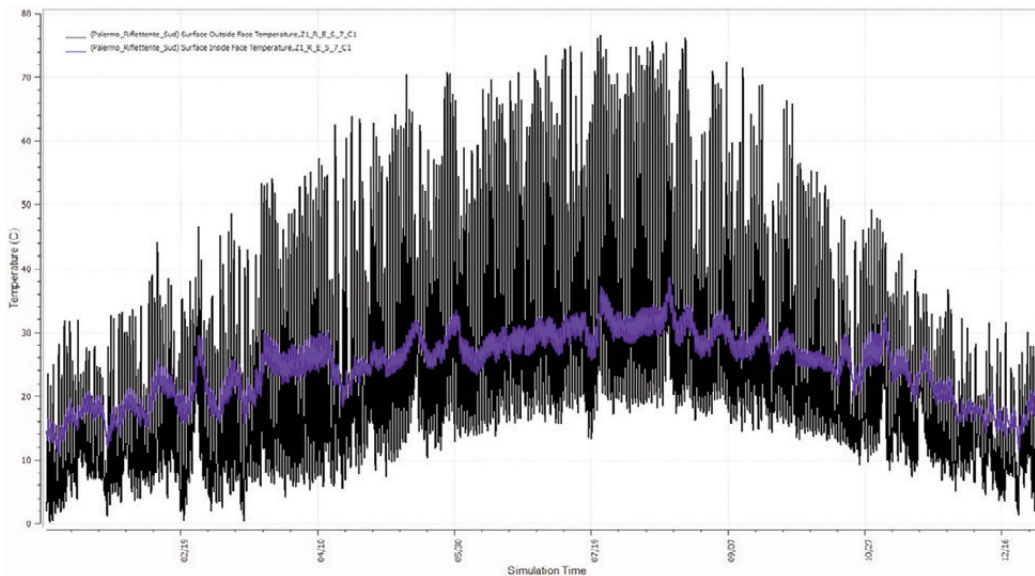


Fig. 9 | Simulation in Palermo, with reflective insulation: comparison of the internal (blue) and external (black) surface temperature of the south-facing roof pitch (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

Fig. 10 | Simulation in Palermo, with reflective insulation: energy transmitted through windows, facing southwest, with active shading (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

portability, and adaptability, as well as those necessary to ensure high energy efficiency and low environmental impact, through the achievement of the following performances: 1) Reduction of energy consumption and CO₂; 2) Wellness and health; 3) Renewable energy production; and 4) Integrated control of energy performance.

To achieve this goal, an in-depth analysis of the state of the art was conducted in the first phase of the research, aimed at identifying the functional, technological and environmental features to be transposed into the new housing module, the design of which – developed in synergy with the group of companies involved – predicted the use of innovative materials (particularly reflective insulation panels) simulated in the design phase and tested in situ in the prototyping phase.

Prefabrication and modularity: from bioclimatic archetypes to contemporary experiments | The analysis of the state of the art, developed as

part of Operational Objective 1, showed how in urban planning, architecture, furniture and industrial design both the concepts of modularity and prefabrication can be traced back to the ancient times. Even primitive nomadic communities made use of modular building components (often wooden logs and textiles) that could be assembled and disassembled to make temporary villages (Balducci and Camilli, 2022): examples are the Aurignacian huts dating back to the Palaeolithic period (Cascone, Russo and Tomasello, 2018) or the Indian tents of Native Americans.

With the advent of the Industrial Revolution, the need to create healthy and functional living contexts in a short period led to the experimentation of more complex dry-assembled technological solutions, realised through the use of standardised steel or wood construction components, which became rapidly popular from the 20th century onward. Notable examples from this period include W. Gropius's Copper House (1929), ex-

pandable according to the client's needs thanks to a special perimeter joint (Herbert, 1984), and F. L. Wright's Jacobs House (1929), designed to cost only \$5,000 and constructed in a platform frame with transportable panels complete with interior finishing elements (Dahlin, 2015).

From the 1940s onwards, following the war, there was an increase in experiments aimed at producing modular, transportable housing units easily adaptable to different construction site morphologies. While in Italy, the National Research Council (CNR) announced a competition for the construction of wooden shacks for military use that were completely dismantlable and transportable (each subcomponent had a unique identification code to facilitate assembly), in the United States, R. Buckminster Fuller designed the Mechanical Wing (1940), a modular residence integrated with a bathroom and kitchen, achievable through an industrial production process inspired by the automotive sector and transportable with a simple trailer (Gorman, 2005).

In 1940, Le Corbusier built Les Maisons Murrondins, designed to be self-built by making use of poor materials, such as wood and unfired earth, available at the construction site (Czub, Kizilkaya and Souilamas, 2017). The basic unit of this typology was sized according to the principles of minimum space requirements, with a width of 3 meters and a length varying between 7, 8, and 10 meters, in which individual cells were then juxtaposed and, if necessary, joined together under a single double-pitched roof that differed from the classic gabled typology through an offset of one of the two pitches in order to obtain an opening on one front that would allow the interior spaces to be illuminated.

However, it was in the immediate post-World War II period that, thanks to economic recovery and the introduction of critical technological solutions designed precisely to speed up prefabrication processes (such as the Packaged House System coupling patented in 1946 by C. Wachmann and W. Gropius), that pre-assembled housing modules are counted among the most effective solutions to support reconstruction, influencing new design currents careful to reduce production time and costs without sacrificing comfort and energy efficiency. These are the years in which building companies are beginning to proliferate in the United States that provide kits for the 'do-it-yourself' construction of single-family housing units, conveniently ordered through a catalogue of standardised components (Knaack, Chung-Klatte and Hasselbach, 2012).

Some of the most interesting experiments of these years are K. Koch's folding Acorn House (1945), produced entirely in the workshop as a single element consisting of easily deployable moving parts (Alter, 2022), and J. Prouvé, conceived as inexpensive, comfortable, functional and durable housing, among which are: the housing modules consisting of prefabricated wooden elements commissioned by the French Ministry of Reconstruction (1945) and designed to house refugees, displaced persons, and the homeless (Vitra Design Museum, 2007).

And again, the fourteen Maisons Industrialisées (1950-52) in Meudon, mountable by only four people without the need for any mechanical means (Pelletier, 2012); the Maison Prouvé (1954), con-

ceived as a lightweight and flexible structure thanks to the assembly of standardised elements, articulated in plan on purely functional principles (Tapias Monné, 2013); the Maison des Jours Meilleurs built in 1954 following the appeal of A. Pierre to provide emergency housing for people with hardships (Serafin, 2012); the Maison du Sahara (1958), a modern prototype of a village house for extreme climates, developed around an aluminium sheet roof reminiscent of a rigid tent under which domestic space is articulated (Irace, 2020).

The 1970s witnessed, thanks in part to the contribution of R. Buckminster Fuller, the spread of housing systems based on the container model that allowed for the adoption of extendable, decomposable and integrable technological solutions. Among the most interesting experiments of the period, one cannot fail to mention Rossellini and Hosoe's Mobile Home, created in collaboration with FIAT for the exhibition entitled Italy – The New Domestic Landscape held at the Museum of Modern Art in New York in 1972: it is a module with a basic unit, contained in 10 square meters, extendable thanks to the presence of special folding walls up to the maximum size of 28 square meters (Rossellini, 1974).

At the same time, new research is conducted on the topic of post-disaster reconstruction, including: the Tilted Box (1970) by K. Kurokawa (Sottosanti, 2018); the Mobile House by Zanuso and Sapper, who in 1971 developed a self-sufficient housing prototype (equipped with a water recovery and drainage system) transportable in a container of about 6 meters (Irace, 2008); the Emergency Shelter System (lit. Sistema Abitativo di Pronto Intervento – SAPI) and its housing version MAPI that between 1982 and 1984 were developed by Pierluigi Spadolini (with G. Fagnoni and G. Spadolini) as multi-purpose, fully equipped, emergency-response modules that are totally prefabricated, salvageable, easily transportable and placeable at any site (Canepa, 2017).

And again, Shigeru Ban's experiments, including the 1995 and 2001 Paper Log Houses (Jodidio, 2015), the 1999 Paper Emergency Shelters for UNHCR (Latka, 2017) and the 2011 Container Temporary Housing (Hikone and Tokubuchi, 2014); A. Aravena made with the innovative Tecnopanel infill panels (Aravena, 2012); the five housing typologies designed in 2007 by MVRDV for the post-Hurricane Katrina reconstruction in New Orleans, inspired by the morphology and technological characteristics of shotgun houses, and made by assembling along the horizontal axis three cubic modules of 3.5 meters side (Feireiss and Pitt, 2009).

In recent years, research on modular housing units has shifted toward the theme of nZEB micro-houses, which can be ordered from online multimedia catalogues, easily customised and assembled by the client to be located in geographic areas with different climates, not necessarily served by infrastructure and services. Notable examples include: the WikiHouse¹, patented in 2011 by architects A. Parvin and N. Ierodiaconou as an open-source building system, the executive design of which can be downloaded from a dedicated website to facilitate its realisation through self-construction processes; the housing prototype BiosPHera 2.0, conceived in 2012 by ZEPHIR to be totally energy independent (Pepe, 2016); the LEAP Home by the Turin-based LeapFactory, de-

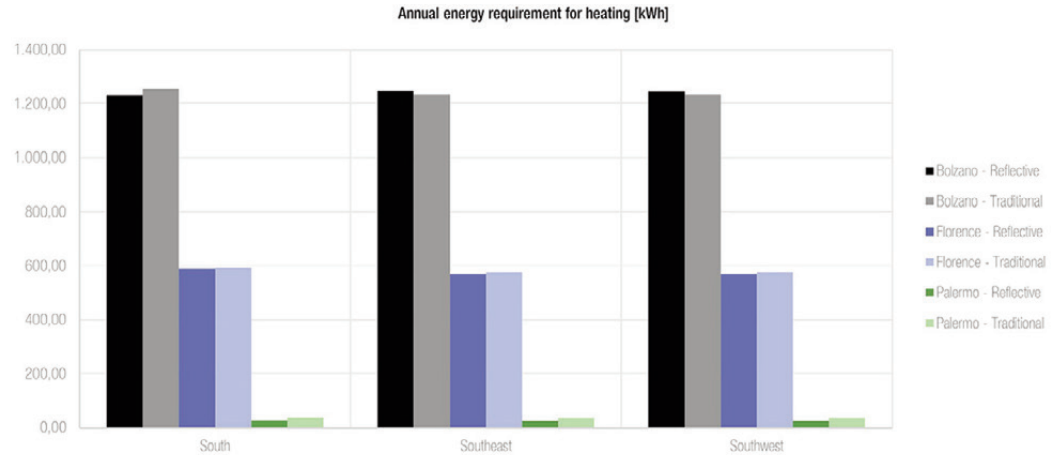


Fig. 11 | Analysis of heating demand (kWh) at the three selected locations (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

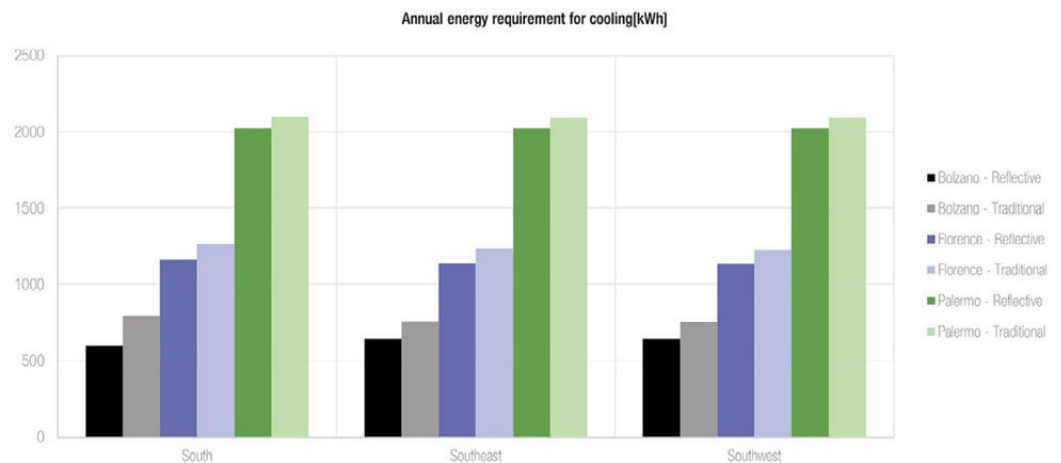


Fig. 12 | Analysis of cooling demand (kWh) at the three selected locations (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).

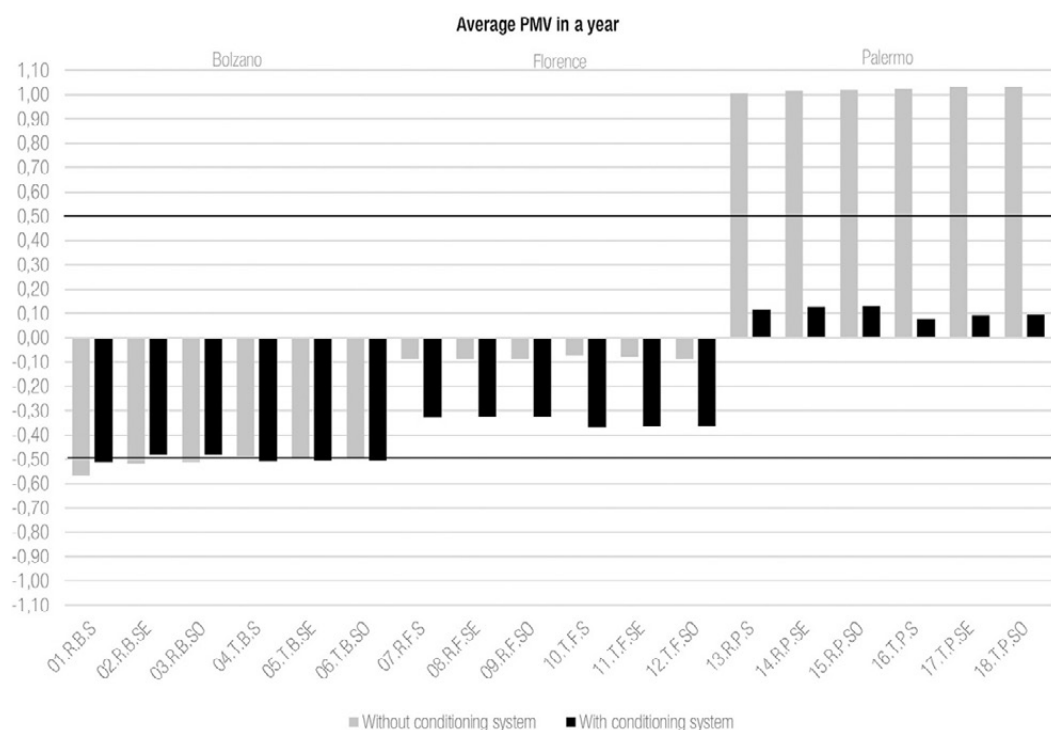


Fig. 13 | Analysis of PMV values averaged over the entire year (credit: R. Romano and E. Di Monte, 2023).



Fig. 14 | Assembly stages of the nZEM Prototype (credit: R. Romano, 2023).

veloped in 2015 as a kit of modular elements that can be assembled in different configurations and equipped with the latest plant engineering technologies (Scalco, 2020).

And again, the WikkellHouse designed in 2017 by Fiction Factory as a modular system characterised by a metal shell around which 24-layer cardboard is wrapped, assembled in 24 hours and whose durability is guaranteed for half a century (Vinci, 2018); the M.A.D.I. Home, created in 2017 by R. Vidal Mezzovico as a basic two-story housing module made of folding panels (a feature that makes it easily transportable by ordinary vehicular vehicles) and customisable with finishing elements and furnishings chosen with respect to the client's needs (Borgobello, 2017); the Minimal prefabricated houses (2021) by Spanish studio Metro 7, inspired by the Passivhaus model and consisting of modular sub-units that can be easily assembled and also used in projects of elevation or extension of existing buildings (Escartín, 2023).

Finally, it is important to note how the theme of temporary housing and modular living systems has attracted the attention of internationally architects in the last century. Notable figures include Renzo Piano, who, in collaboration with Matthias Schuler and Maurizio Milan, created the Diogene prototype (2009), a minimal wooden dwelling measuring 2.40 x 2.96 meters; this innovative housing solution was realised in 2013 on the Vitra Campus (Di Marzo, 2013). Additionally, Richard Rogers made significant contributions in 2015 with the

Prouve House (Winston, 2015) and subsequent patents for innovative prefabricated housing modules in a platform frame. These 'plug and play' modules, designed for on-site assembly with low environmental impact, were employed to construct the Y:Cube social housing neighbourhood in 2015 (Wainwright, 2015) and in 2017 the PLACE / Ladywell temporary housing complex (Harris, Brickell and Nowicki, 2019) in London.

Furthermore, the Danish studio BIG proposed the housing model of the Beach Huts in 2019 for the construction of 21 small residential units (21 sqm) made of platform frame and clad in burnt wood (Hofmeister, 2022). Also, Norman Foster, during the 2023 Venice Architecture Biennale, presented the prototype of a tiny dwelling made with an innovative load-bearing envelope consisting of a double layer of roll-up fabric impregnated with low-carbon cement and laid on lightweight formwork which solidifies in 24 hours (Benetti, 2013).

The achievements described contributed to the analysis of the evolution of the design and construction processes of modular housing systems conducted in the preliminary phase of the nZEM project and were returned in a synoptic picture (Fig. 1) of the state of the art from which some interesting recurrences emerged that were used in the proposal phase to develop the design of the housing prototype that is the subject of the nZEM research. The historical excursus highlights how the design and implementation of this building typology has always been inspired by the need to respond

quickly and inexpensively to the housing emergency without sacrificing primary indoor comfort conditions. All examples chosen as case studies are realised by assembling elementary modular units or kits of standardised components. They are integrated with furniture and systems, developed using construction processes inspired by the automotive and interior design industries, and manageable by creating easily adaptable virtual models to the client's needs. These living units can be easily transported to the construction site and assembled without the need for skilled labour; they prefer the use of prefabricated substructures, which are lightweight and easily integrated with insulation and finishing materials that can guarantee durability and adequate mechanical and thermal performance; they present a linear planimetric distribution, in which the entrance is placed on the short side of the pre-fab while the openings of the various rooms on the long side.

Moreover, it is evident how, over time, the attention of designers has shifted from the adoption of analogue technological solutions to the development of systems manageable by digital tools that, through product and process innovation, would allow for the acceleration of prefabrication and assembly processes, making room for experiments inspired by digital and ecological transitions and aimed at improving the quality of the built environment with a view to environmental sustainability, resource optimisation, performance predictability and customisation (Pone, 2022).

The nZEM housing module | Inspired by the examples examined in the state-of-the-art analysis phase, the nZEM housing unit (32.00 sq. m.) was designed to be built by horizontally flanking four basic modules (each 8.00 sqm in size, one of which is intended to house a plant cell) constructed by assembling low-impact (wood, rock wool insulation, etc.) and innovative (reflective insulation, PV, etc.) materials into opaque envelope components made of platform frames and integrated with high-performance transparent elements and renewable energy generation technologies (Fig. 2). In detail, the chosen building system has the features listed below.

The opaque vertical enclosures are constructed by assembling the following materials from the exterior to the interior: a covering of 0.4 cm aluminium slats; a 4 cm ventilated cavity; a 2.2 cm wood-cement panel; a 10 cm wood fibre panel; a 1.5 cm OSB panel; a 4 cm reflective insulation panel; a 7 cm air gap; a 2.2 cm wood-cement panel with an external white plaster finish (U: 0.18 W/sqmK; Y: 0.05 W/sqmK).

The upper opaque horizontal closure consists of two inclined slopes with the following stratigraphy from the outside to the inside: a covering of 0.4 cm aluminium slats; a 4 cm ventilated cavity; a 2.2 cm wood-cement panel; a 10 cm wood fibre panel; a 1.5 cm OSB panel; a 4 cm reflective insulation panel; a 2.5 cm air gap; a 2.2 cm wood-cement panel with an external white plaster finish (U: 0.18 W/sqmK; Y: 0.05 W/sqmK).

The lower horizontal closure is designed as a raised floor resting on lamellar beams anchored to the ground and presents the following stratigraphy from bottom to top: a 1.3 cm reinforced cement Aquapanel slab; a 10 cm cellular glass insulation panel; a 1.5 cm OSB panel; a 5 cm cellular glass insulation panel; a 2.5 cm gypsum fibre slab with milling for radiant floor heating pipes; a 0.2 cm thermo-conductive mat; a 1 cm floating wood floor (U: 0.21 W/sqmK; Y: 0.10 W/sqmK).

The vertical transparent closures are made with thermal break aluminium frames and low-emissivity double glazing with a U_w transmittance of 1.2 W/sqmK, while the upper one is made with thermal break aluminium frames and triple partitioning infilled in the centre with low-emissivity double glazing and on the sides with innovative photovoltaic panels integrated with copper pipes for domestic hot water production (U_w : 1.2 W/sqmK).

Following the pattern of some examples studied, the basic nZEM module was designed to be totally prefabricated on the shop floor with respect to two volumetric options (single or double pitch) with dimensions of 410 cm wide, 240 cm deep, and 350 cm high. Size and weight (5,000 kg) were calibrated against the need to easily transport one or more modules to the construction site without resorting to extraordinary means (Fig. 3). By assembling the basic modules through hold-down connections, it is possible to generate ever-changing settlement spaces and layouts that can be customised to the needs of users and the climatic characteristics of the site, without changing the overall energy and structural performance. The use of totally dry-assembled solutions guarantees the total reversibility of the elementary sub-units and the consequent recycling of all materials used.

As previously mentioned, the decision to build a modular and customisable housing unit resulted

in the need to control all the design phases through the construction of a BIM model, managed using Autodesk REVIT software, through the creation of parametric 3D families containing the technical, physical and economic information of each of the materials and components used. In order to bring the process in line with the principles envisaged by mass customisation, within the Revit model, each family module can be integrated with compatible elements or systems, analysing in real time how energy consumption, costs, environmental impact, etc., vary as design choices change.

In addition, with the idea of creating a configurator accessible to external users, a product sheet has been developed that allows for variable configuration of both the basic module and the housing unit in relation to the construction site. The tab contains pre-filled fields and allows users to choose from a number of preset options designed to ensure that the energy and environmental performance required by Italian regulations is achieved. For example, the basic module can be built according to two types: 1) classic double-pitch module; or 2) single-pitch performance module. In addition, it is possible to choose which type of stratigraphic package is most suitable for the climatic condition of insertion and what happens by changing the type of external cladding. In addition, within the Revit model, each family module can be integrated with compatible elements or systems such as windows, doors, dormers, photovoltaic systems, etc. (Fig. 4).

The interoperability of the configurator allows the end user, through the export of files in .ifc format, to use, in the first instance, a BIM software to evaluate the thermo-hygrometric performance of the chosen envelope elements and determine the achievable energy class based on the volumetric and technological choices made. Finally, the model generated by the configurator can be exported to other free software Daylight Visualizer software to calculate the average daylight factor in real-time, choosing the correct positioning of the transparent elements accordingly.

Energy simulations and validation of the technological system

Parallel to the modelling with REVIT software, the validation of the project was conducted through the use of energy simulations conducted in a dynamic regime and developed with Energy Plus software to verify the thermo-physical behaviour of the elementary housing unit throughout the year, controlling the numerous variables present in the designed building-plant system and making an accurate estimate of consumption and performance.

The objective was to support the design choices and analyse the energy-environmental behaviour of the module with respect to three climatic conditions (temperate, hot and cold climate) characterising the Italian territory, to adequately support both the prototyping and the dissemination phase of the results. Therefore, it was decided to simulate the basic housing module with respect to 18 configurations (Fig. 5) arising from the intersection of the following parameters: 1) geographical location and climate type; 2) orientation of the module with respect to the longitudinal axis; and 3) envelope stratifications, comparing the thermo-hygrometric performance of the technological solution habitually used by LAM (EPS and mineral wool),

compared to a solution insulated with reflective insulation and wood fibres (Fig. 6).

Simulations were conducted by dividing the elementary dwelling unit into two thermal zones: 1) living room / kitchen; and 2) bathroom area. For both, an air exchange rate of 0.5 vol/h was assumed, increased to 4 vol/h for the summer months in the locations of Florence and Palermo, where windows are assumed to be opened during the night hours of the hottest days to dissipate accumulated heat. Furthermore, to evaluate indoor comfort parameters according to Fanger's model (PMV and PPD), it was assumed that zone 1 was inhabited throughout the year by a single person, with a colour (sensible and latent) equal to 150 W/person for daytime hours and 100 W/person for nighttime hours, with a metabolic value per user of 0.1, creating an annual schedule of clothing thermal resistance parameters (clo). The air velocity in all rooms was set equal to 0.2 m/s.

The simulation then took into account the presence of lighting fixtures, entering data on the installed electrical wattages (equal to 15 W/sqm) and identifying the lighting profiles based on the occupancy levels of the two thermal zones. For electrical equipment, the presence in zone 1 of a 200 W refrigerator, a 900 W microwave oven, and a 6,000 W induction cooktop was assumed, for a total power output of 7,100 W and according to a usage profile set on an hourly basis. In order to estimate the energy requirements needed to maintain the indoor temperature in the comfort range throughout the year, an ideal system was modelled, designed as an HVAC system for heating and cooling, supplemented by a thermostat with two limit levels, one for winter (equal to 20 °C) and one for summer (equal to 26 °C). Finally, to analyse the contribution of integrated technologies to produce renewable energy, the model was implemented by inserting a 3.4 kWp monocrystalline silicon photovoltaic system in the roof pitches.

Simulation results | Dynamic regime simulations conducted for the modular housing model described earlier yielded the following results:

- in relation to the choice of the best orientation of the module in the three geographical locations, it is shown that orientation does not significantly affect the trend of indoor temperatures (Fig. 7);
- regarding the comparison of the achievable performance using the two envelope stratifications, it is found, in all geographic locations and with respect to all orientations, that with the nZEM closure solution, containing the reflective insulation, the internal temperature of both thermal zones has less fluctuation than with the LAM solution, both in winter and summer; therefore, the nZEM closure is less affected by the variation of the external temperature (Fig. 8);
- in comparing the internal and external surface temperature of the roofing slab, it is found that the nZEM stratigraphy makes it possible to reduce heat transmission between the external and internal environments, with differences in the surface temperatures of the two closure layers (internal and external) reaching as high as 40 °C in summer at the Palermo location (Fig. 9);
- with respect to the effectiveness of installing movable screens on the outside of the transparent closures (which can be automatically activated when the incident solar radiation on the win-

dows reaches 100 W/sqm), simulations have shown that in all modelled configurations, this solution makes it possible to reduce thermal loads in the summer months without limiting passive solar contributions in the winter months (Fig. 10);

- when comparing annual heating requirements (Fig. 11), it is generally shown that the housing module performs better in Palermo (with estimated consumption of around 30 kWh) than in Florence (1,200 kWh) and Bolzano (580 kWh);
- analysing what happens, however, with respect to annual cooling demand (expressed in kWh) shows that although there are substantial differences among the three locations (with lower demand in Bolzano, where temperatures are generally lower in the summer months than in Florence and Palermo), the nZEM stratigraphy with reflective insulation allows in all three locations and for each orientation to reduce overall consumption (Fig. 12);
- with respect to the analysis of PMV values averaged over the entire year, with and without the air conditioning system active, the predictive analyses (Fig. 13) show how using both envelope stratigraphies, if for the Bolzano location the comfort sensation remains almost unchanged both with and without the system (staying at the lower limit of the comfort range of - 0.5), for the Palermo location it is evident how without the system adequate comfort conditions are not achieved (reaching a value of 1: slightly warm).

Conclusions | The nZEM research is part of the ongoing experimentation in the international scene in terms of the design and implementation of low-impact housing systems to respond both to emergencies brought about by natural disasters and to the need to build comfortable homes in a short time and at a reduced cost. In this context of investigation, the theme of modularity and scalability of building systems becomes crucial in order to

find and develop innovative proposals inspired by the adoption of product and process technological solutions that allow to optimise and control all the construction phases according to a systemic approach of Life Cycle Assessment matrix.

To meet this requirement, the design of the nZEM housing module was supported by creating a BIM model and a digital configurator that allowed to check the achievable performance by assembling in a varied way the elementary units and subcomponents that constitute the building system. The energy simulation phase made it possible to test the thermohygrometric performance of the proposed envelope stratigraphy, which is characterised by the use of reflective insulation panels chosen to reduce the thickness of the closure systems; to date, there is no evidence of studies that support their adoption in pre-assembled drywall hotels such as those proposed as part of this research.

Unfortunately, it was impossible to conduct a more in-depth analysis of the environmental impact of the housing module by carefully studying the stages of material procurement and the production, assembly and decommissioning supply chains of the components used. While waiting to find the resources to conduct these necessary in-depth investigations and start the process of patenting the basic module and its subcomponents, the prototype, currently under construction (Fig. 14), will be monitored in the coming months in a real environment to assess whether the performance inferred from the simulation phase is achievable.

In any case, the results achieved support the methodology adopted, which already at this stage of the research can be considered effective in promoting a process of knowledge transfer between the academic and industrial sectors, supporting process and product technological innovation in

the field of prefabrication and production of modular housing units, in line with the precepts of Reversible Building Design (Durmisevic, 2018) and the Circular Economy Action Plan issued by the European Union in 2020 (European Commission and Directorate-General for Communication, 2020).

Acknowledgements

The nZEM project was funded by the Tuscany Region under the POR CREO FESR 2014/2020 – Action 1.1.5. sub-action a1) – Call for tenders 2 ‘Progetti di ricerca e sviluppo delle MPMI’ (lit. ‘Research and Development Projects for SMEs’). We would like to express our gratitude to all the companies involved in the research activities (LAM Ambiente; Vigiani Srl; Vetreria Vitrum; Verdiani & Linari Srl; BRT Consulting); the TAM Laboratory of DIDA and the Interuniversity Center ABITA of UniFI for their instrumental support during the analysis phases; and Dr. L. Bernini for contributing to the design and implementation of the prototype. The contribution reflects the collective thinking of the authors. Nevertheless, the introductory paragraphs, ‘The nZEM Research’, ‘Prefabrication and modularity: from bioclimatic archetypes to contemporary experiments’, ‘The nZEM housing module’, and ‘Conclusions’ should be attributed to R. Romano, while the paragraphs ‘Energy Simulations and Validation of the Technological System’ and ‘Simulation results’ to E. Di Monte.

Notes

1) For more information, see the webpage: wikihouse.cc/design/what-is-wikihouse [Accessed 31 October 2023].

References

- Alter, L. (2022), “Boxabl Launches \$50K Foldable House”, in *Treehugger Sustainability for All*, 25/11/2022. [Online] Available at: treehugger.com/boxabl-reinvents-the-foldable-house-5197170 [Accessed 31 October 2023].
- Aravena, A. (2012), *Elemental – Manual de vivienda incremental y diseño participativo*, Hatje Cantz.
- Baiani, S. and Altamura, P. (2019), “Il Processo del Progetto per la Resource Productivity – Un Caso Studio | The Design Process towards Resource Productivity – A Case Study”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 83-92. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/592019 [Accessed 11 October 2023].
- Balducci, B. and Camilli, F. (2022), “Progettare l’ecologia – Il vegetale come paradigma possibile di un’architettura sostenibile e resiliente | Designing ecology – The organic as a possible paradigm of a sustainable and resilient architecture”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 84-93. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1172022 [Accessed 11 October 2023].
- Benetti, A. (2023), “Norman Foster’s tiny dwelling as the evolution of the minimal house”, in *Domusweb*, 13/06/2023. [Online] Available at: [domusweb.it/it/citta-sostenibili/gallery/2023/06/09/norman-foster-foundation-e-holcim-presentano-](https://domusweb.it/it/citta-sostenibili/gallery/2023/06/09/norman-foster-foundation-e-holcim-presentano-essential-home.html)

[essential-home.html](https://domusweb.it/it/citta-sostenibili/gallery/2023/06/09/norman-foster-foundation-e-holcim-presentano-essential-home.html) [Accessed 31 October 2023].

Bhandari, S., Riggio, M., Jahedi, S., Fischer, E., Muszynski, L. and Luo, Z. (2023), “A review of modular cross laminated timber construction – Implications for temporary housing in seismic areas”, in *Journal of Building Engineering*, vol. 63, part A, article 105485, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2022.105485 [Accessed 8 October 2023].

Bologna, R. (2018), “Complementarietà fra permanente e temporaneo | Complementarity between permanent and temporary”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 4, pp. 81-88. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/4102018 [Accessed 11 October 2023].

Borgobello, B. (2017), “Flatpack M.A.Di house pops up in a matter of hours”, in *Newatlas*, 11/11/2017. [Online] Available at: newatlas.com/madi/52139/ [Accessed 31 October 2023].

Canepa, S. (2017), “Living mobile for emergency – Lessons from big architects”, in Vaudetti, M., Minucciani, V., Canepa, S., Onay S. N. (eds), *Suspended Living in Temporary Space – Emergencies in the Mediterranean Region | International Conference Proceedings, 9 October 2017, Politecnico di Torino, Turin, Italy*, Lettera Ventidue Edizioni, Siracusa, pp. 25-32.

Cascone, S., Russo, G. and Tomasello, N. (2018), “An historical study on temporary and emergency post-disaster

- housing”, in *TEMA | Technologies Engineering Materials Architecture*, vol. 4, issue 2, pp. 47-58. [Online] Available at: doi.org/10.17410/tema.v4i2.193 [Accessed 11 October 2023].
- Czub, M., Kizilkaya, A. and Souilamas, M. (2017), “Le Corbusier, Maison Murodins, France, 1940”, in *Atlas of Interiors*, 04/11/2017. [Online] Available at: atlasofinteriors.polimi.it/2017/11/14/le-corbusier-maison-murodins-1940/ [Accessed 31 October 2023].
- Dahlin, K. (2015), *The Jacobs I House – Wright’s Prescription for Modest Cost Housing*. [Online] Available at: issuu.com/kendahlin/docs/jacobsfinal-dahlin [Accessed 31 October 2023].
- Di Marzo, C. (2013), “Renzo Piano firma Diogene – Il più piccolo edificio del Vitra Campus”, in *Archiportale*, 17/06/2013. [Online] Available at: archiportale.com/news/2013/06/case-interni/renzo-piano-firma-diogene-il-pi%C3%B9-piccolo-edificio-del-vitra-campus_34102_53.html [Accessed 31 October 2023].
- Durmisevic, E. (2018), *WP3 – Reversible Building Design Guidelines*, BAMB. [Online] Available at: bamb2020.eu/wp-content/uploads/2018/12/Reversible-Building-Design-guidelines-and-protocol.pdf [Accessed 31 October 2023].
- European Commission (2023), *Horizon Europe – Work Programme 2023-2024 – General Introduction*. [Online] Available at: ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2023-2024/wp-1-general-introduction_horizon-2023-2024_en.pdf [Accessed 11 October 2023].
- European Commission (2021), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A New European Bauhaus – Beautiful, Sustainable, Together*, document 520 21DC0573, 573 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2021%3A573%3AFIN [Accessed 11 October 2023].
- European Commission and Directorate-General for Communication (2020), *Circular Economy Action Plan – For a cleaner and more competitive Europe*, Publications Office of the European Union. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2779/05068 [Accessed 11 October 2023].
- Escartín, J. (2023), “La forma más rápida de hacer una vivienda en el pueblo o en un terreno – Casas modulares”, in *Heraldo*, 14/04/2023. [Online] Available at: heraldo.es/noticias/economia/2023/04/13/casas-modulares-zaragoza-mas-rapidas-1644693.html [Accessed 31 October 2023].
- Feireiss, K. and Pitt, B. (2009), *Architecture in Times of Need – Make It Right – Rebuilding New Orleans’ Lower Ninth Ward*, Prestel.
- Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme (2022), *2022 Global Status Report for Buildings and Construction – Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. [Online] Available at: unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction [Accessed 11 October 2023].
- Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme (2019), *2019 Global Status Report for Buildings and Construction – Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*. [Online] Available at: IEA.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019 [Accessed 11 October 2023].
- Gorman, M. J. (2005), *Buckminster Fuller – Architettura in movimento*, Skira, Milano.
- Grosso, M. and Chiesa, G. (2014), “PR.I.M.E3. – Procedure Innovative per Moduli Edilizi Energeticamente Efficienti ed Eco-compatibili | PR.I.M.E3. – Procedure for Innovative building Modules Energy Efficient and Eco-compatible”, in *Techné | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 7, pp. 210-216. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techné-14552 [Accessed 11 October 2023].
- Harris, E., Brickell, K. and Nowicki, M. (2019), *Temporary Homes, Permanent Progress? Resident Experiences of PLACE/Ladywell*, Royal Holloway, University of London. [Online] Available at: pure.royalholloway.ac.uk/ws/portalfiles/portal/34520821/LewishamReport_FINAL_Sep_2019.pdf [Accessed 31 October 2023].
- Herbert, G. (1984), *The Dream of the Factory-Made House – Walter Gropius and Konrad Wachsmann*, The MIT Press. [Online] Available at: doi.org/10.7551/mitpress/2494.001.0001 [Accessed 31 October 2023].
- Hikone, S. and Tokubuchi, M. (2014), “Temporary Multi-storey Container House after Earthquake and Tsunami Disaster on March 11, 2011”, in *LABSE Symposium Report*, vol. 102, pp. 1699-1706. [Online] Available at: doi.org/10.2749/222137814814067950 [Accessed 31 October 2023].
- Hofmeister, S. (2022), *BIG – Architecture and Construction Details*, Edition Detail.
- Ibañez, D., Guallart, V. and Salka, M. (2022), “La prototipizzazione pedagogica di edifici ecologici avanzati e biocittà presso il Valldaura Labs | On pedagogical prototyping of advanced ecological buildings and biocities at Valldaura Labs”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 136-149. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11122022 [Accessed 11 October 2023].
- Irace, F. (2020), “From the archive – Jean Prouvé’s designs for prefab shelters”, in *Domusweb*, 07/05/2023. [Online] Available at: domusweb.it/it/dall-archivio/2020/05/07/i-progetti-di-jean-prouve-per-strutture-domestiche-prefabbricate-di-metallo.html [Accessed 31 October 2023].
- Irace, F. (ed.) (2008), *Casa per tutti – Abitare la città globale*, Triennale Electa, Milano.
- Jodidio, P. (2015), *Shigeru Ban – Complete Works 1985-2015*, Taschen, Köln.
- Kamali, M., Hewage, K. and Sadiq, R. (2019), “Conventional versus modular construction methods – A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings”, in *Energy and Buildings*, vol. 204, article 109479, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109479 [Accessed 11 October 2023].
- Knaack, U., Chung-Klatte, S. and Hasselbach, R. (2012), *Prefabricated Systems – Principles of Construction*, Birkhäuser Architecture.
- Latka, J. F. (ed.) (2017), “Introduction”, in *A+BE | Architecture and the Built Environment*, pp. 33-46. [Online] Available at: doi.org/10.7480/abe.2017.19 [Accessed 31 October 2023].
- Pelletier, G. (2012), *La victoire du prototype – L’utopie de la maison prefabrique chez les architectes du Mouvement moderne – Le Corbusier, Walter Gropius, Jan Prouvé (1932-1952)*, PhD Tesis, Ecole Nationale Supérieure d’Architecture de Paris La Villette. [Online] Available at: issuu.com/gracepelletier/docs/masterthesis-gpelletier [Accessed 31 October 2023].
- Pepe, D. (2016), “L’esperienza dell’abitazione BiosPHERA 2.0 – Energy Revolution – Il progetto dimostrativo della validità e fattibilità del concetto di edificio off grid”, in *L’Ufficio Tecnico*, n. 5, pp. 24-31. [Online] Available at: researchgate.net/publication/335961697_L%27esperienza_dell%27abitazione_BiosPHERA_20_Energy_Revolution_Il_progetto_dimostrativo_della_validita_e_fattibilita_del_concetto_d_i_edificio_off_grid [Accessed 31 October 2023].
- Pone, S. (2022), “Maker – Il ritorno dei costruttori – Una possibile transizione digitale per l’Architettura | Maker – The return of the builders – A possible digital transition for Architecture”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 14-23. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1212022 [Accessed 11 October 2023].
- Radogna, D. (2018), “Emergenza e turismo in Abruzzo – Un sistema per alloggi temporanei | Emergency and tourism in Abruzzo – A temporary house system”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 4, pp. 177-186. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/4222018 [Accessed 11 October 2023].
- Rossellini, A. (1974), *Lo spazio aperto – Ricerca e progettazione tra design e architettura*, Pizzi, Cinisello Balsamo.
- Sathre, R. and González-García, S. (2014), “Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials”, in Pacheco-Torgal, F., Cabeza, L. F., Labrincha, J. and de Magalhães, A. (eds), *Eco-efficient Construction and Building Materials*, Woodhead Publishing Limited, pp. 311-337. [Online] Available at: doi.org/10.1533/9780857097729.2.311 [Accessed 11 October 2023].
- Scalco, C. (2020), “Leap Home – Case modulari reversibili e performanti”, in *Arketipo*, 04/05/2020. [Online] Available at: arketipomagazine.it/leap-home-case-modulari-reversibili-e-performanti/ [Accessed 31 October 2023].
- Serafin, A. (2012), “Patrick Seguin restores Jean Prouvé’s Maison des Jours Meilleurs”, in *Wallpaper*, 16/10/2022. [Online] Available at: wallpaper.com/architecture/patrick-seguin-restores-jean-prouvs-maison-des-jours-meilleurs [Accessed 31 October 2023].
- Smith, R. E. and Quale, J. D. (2017), *Offsite Architecture – Constructing the Future*, Routledge.
- Sottosanti, L. A. S. (2018), *Smartbox – Reused container for a student dormitory in the city of Hamburg*, Master Thesis, Architecture for the Sustainability Design, Politecnico di Torino. [Online] Available at: webthesis.biblio.polito.it/8613/ [Accessed 31 October 2023].
- Sposito, C. and Scalisi F. (2019), “High-rise timber architecture – An opportunity for the sustainability of the built environment”, in De Giovanni, G. and Scalisi, F. (eds), *Pro-Innovation – Process Production Product*, Palermo University Press, Palermo, pp. 93-122. [Online] Available at: doi.org/10.19229/978-88-5509-055-1/272019 [Accessed 11 October 2023].
- Tapias Monné, D. (2013), *La maison Prouvé en Nancy*, Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Projectes Arquitectònics. [Online] Available at: tdx.cat/handle/10803/117024?locale-attribute=es#page=2 [Accessed 31 October 2023].
- Vinci, R. (2018), “La casa di cartone che si costruisce in 24 ore – Riciclabile, antisismica e modulare – La Wikkellhouse sta per sbarcare in Italia”, in *Archiportale*, 19/12/2018. [Online] Available at: archiportale.com/news/2018/12/architettura/la-casa-di-cartone-che-si-costruisce-in-24-ore_67658_3.html [Accessed 31 October 2023].
- Vitra Design Museum (2007), *Jean Prouvé – The poetics of the technical object*, Skira, Milano.
- Wainwright, O. (2015), “Return of the prefabs – Inside Richard Rogers’ Y:Cube homes for homeless people”, in *The Guardian*, 08/09/2015. [Online] Available at: theguardian.com/artanddesign/architecture-design-blog/2015/sep/08/inside-richard-rogers-ycube-homes-for-homeless-people [Accessed 31 October 2023].
- Winston, A. (2015), “Richard Rogers updates Jean Prouvé’s 6x6 Demountable House for Design Miami/Basel”, in *Dezen*, 11/06/2015. [Online] Available at: dezen.com/2015/06/11/richard-rogers-updates-jean-prouve-6x6-demountable-house-design-miami-basel-2015-galerie-patrick-seguin/ [Accessed 31 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	17 September 2023
Revised	13 October 2023
Accepted	22 October 2023
Published	31 December 2023

PATTERN MODULARI NEL DESIGN IGROSCOPICO CON STAMPA 4D

Forma e programmazione del materiale

MODULAR PATTERNS IN HYGROSCOPIC 4D PRINTING DESIGN

Form and programming of the material

David Correa, Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Giulia Pelliccia

ABSTRACT

La ricerca illustra l'impiego della stampa 4D (4DP) per la creazione di attuatori di ispirazione biologica e igro-responsivi con Compositi Polimerici di Legno (WPC), evidenziando come il controllo della cinematica attraverso la programmazione dei materiali e dei parametri di stampa consenta di ottenere meccanismi dinamici di cambiamento di forma in risposta a fattori ambientali. Nella 4DP le configurazioni geometriche degli oggetti stampati dipendono non solo dai materiali, ma anche dalla loro combinazione, dal tempo e dagli stimoli ambientali, introducendo il concetto di architettura del materiale e ridefinendo il rapporto tra forma e materia. In questo articolo viene discussa la relazione tra gli attuatori responsivi 4DP WPC, l'architettura del materiale e le deformazioni igroscopiche, evidenziando il ruolo dei modelli modulari nella definizione della reazione allo stimolo e della configurazione finale dell'oggetto.

4D Printing (4DP) can be used to create bio-inspired, hygro-responsive actuators using Wood Polymer Composites (WPCs). The research emphasises the role of precise control of kinematics through material programming and printing parameters to achieve dynamic shape-change mechanisms in response to environmental factors. In 4DP, the geometric configurations of printed objects depend not only on the materials but also on their combination, time, and environmental stimuli, leading to the concept of material architecture: in the context of 4DP, the relationship between form and matter is, therefore, redefined. In this paper, the relationship between the responsive WPCs 4DP actuators with their material architecture and their hygroscopic deformations is discussed, highlighting the role of the modular patterns in the definition of the reaction to the stimulus and the final configuration of the object.

KEYWORDS

soluzioni bio-ispirate, cambiamento di forma, programmazione del materiale, compositi a base di legno, modelli modulari

bio-inspired solutions, shape change, material programming, wood-based composites, modular patterns

David Correa, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Architecture of the University of Waterloo (Canada) and a Design Partner at LLLab Architects. His research looks at biological structures and processes as a source of insight for the development of new fabrication processes and advanced materials. E-mail: david.correa@uwaterloo.ca

Fabio Bianconi, Engineer and PhD, is an Associate Professor at the Department of Civil and Environmental Engineering of Perugia (Italy). He carries out his research in representation, landscape simulation, design and architectural survey. E-mail: fabio.bianconi@unipg.it

Marco Filippucci, Engineer and PhD, is a Researcher at the Department of Civil and Environmental Engineering of Perugia (Italy) and his research focuses on the image of the city, digital techniques of representation, and architectural and landscape drawing. E-mail: marco.filippucci@unipg.it

Giulia Pelliccia is an Engineer and PhD with a Thesis titled 'Hygroscopic indoor design – Morphological and material programming of responsive wooden bilayers and 4D printing shape-change mechanisms'. E-mail: giulia.pelliccia@outlook.it



Gli studi bio-ispirati guardano alla natura per trovare soluzioni tecniche a una moltitudine di temi di ricerca, dall'architettura alla soft robotics e alla medicina (Poppinga et alii, 2020), con un'attenzione anche alle tecnologie di fabbricazione che possono supportare la traduzione di questi principi bio-ispirati in applicazioni funzionali. La stampa 3D (3DP) è sempre più utilizzata per questi scopi e, grazie a un'ampia varietà di applicazioni (Khosravani e Reinicke, 2020) e alla sua personalizzazione, si presta anche a essere utilizzata in modi non convenzionali. A differenza dei normali processi industriali di fusione, estrusione o fresatura, la fabbricazione di materiali di ispirazione biologica richiede un'attenta coreografia delle architetture dei materiali su più scale di lunghezza. Attraverso la 3DP è possibile fabbricare Materiali Compositi Funzionalmente Graduati (Functionally Graded Composite Materials – FGCM), ovvero materiali ingegnerizzati avanzati che presentano una variazione graduale e controllata della composizione, della struttura o delle proprietà nel loro volume (Udupa, Rao and Gangadharan, 2014). Inoltre la 3DP ha mostrato un potenziale nello sviluppo di materiali intelligenti, le cui proprietà cambiano in reazione a stimoli esterni come luce, calore, solventi, corrente elettrica o acqua (Addington and Schodek, 2005; Tibbits, 2013; Mustapha and Metwalli, 2021).

La 3DP basata sulla tecnologia Fused Deposition Modelling (FDM), che è uno dei metodi più utilizzati grazie ai bassi costi e alla possibilità di personalizzazione (Ni et alii, 2017), utilizza un filamento continuo di un polimero termoplastico che può essere ripetutamente fuso quando viene riscaldato e solidificato quando viene raffreddato. La FDM consente un controllo preciso dei parametri di stampa (temperatura, velocità, estrusione e altezza) e dei modelli di organizzazione del percorso di stampa (shell, infill e direzione di stampa) che portano alla definizione di caratteristiche meccaniche dipendenti dalla direzione nel pezzo risultante (Ahn et alii, 2002).

Definendo la relazione delle caratteristiche di organizzazione del materiale tra gli strati il processo FDM consente di progettare direttamente la meso-architettura del materiale (Tahouni et alii, 2021), una caratteristica unica che si è rivelata particolarmente adatta allo sviluppo di compositi 3DP con uno specifico comportamento di cambiamento di forma 4D, ottenuto grazie alla programmazione dell'architettura del materiale (Correa, 2022). Tali cinematismi di cambiamento di forma, essendo dipendenti dal tempo, prendono il nome di stampa 4D (4DP), poiché viene considerata la quarta dimensione del tempo necessaria per la trasformazione (Tibbits, 2013) che può avvenire in risposta a molteplici stimoli come il calore (Ge et alii, 2014), le variazioni di umidità relativa nell'aria (Le Duigou et alii, 2019; Tomec et alii, 2021) o il contatto diretto con l'acqua per immersione (Shiblee et alii, 2019; Le Duigou et alii, 2020).

La progettazione degli attuatori 4DP avviene attraverso la reiterazione di moduli di organizzazione dei materiali che funzionano come blocchi di costruzione a diverse scale gerarchiche e sono responsabili del comportamento 4DP risultante in risposta a uno stimolo target (Le Duigou and Correa, 2022). Tali moduli si basano sulla definizione delle linee del percorso di stampa che avviene creando dei pattern dipendenti dalla direzione i quali carat-

terizzano l'architettura del materiale del composito, ne dettano le proprietà meccaniche e regolano la reazione passiva alle variazioni di umidità.

Il disegno di questi pattern viene utilizzato per progettare la meso-scala della struttura a doppio strato, definendo due strati funzionali principali, con pattern differenziati e altamente anisotropi, in relazione reciproca: uno strato di espansione sensibile all'umidità e uno strato di vincolo non responsivo. La struttura a doppio strato si basa sulle relazioni note per i bi-metalli sviluppate da Timoshenko (1925), considerando uno strato di espansione igroscopico, che è responsabile delle variazioni dimensionali dei compositi assorbendo e rilasciando l'umidità, e uno strato di vincolo, che ha invece coefficienti igroscopici molto più bassi. Le variazioni di forma 4D sono quindi progettate definendo geometricamente le proprietà dipendenti dalla direzione per ogni strato, in funzione delle quali l'espansione igroscopica produce una forma pre-determinata col passare del tempo (Correa and Menges, 2015; Rüggeberg and Burgert, 2015; Le Duigou et alii, 2016; Vailati et alii, 2018; El-Dabaa, Salem and Abdelmohsen, 2021).

Attraverso il metodo 4DP si crea una connessione unica tra materia e forma che permette di innovare la precedente ricerca sui compositi laminati a doppio strato. Le proprietà dei materiali derivano da forme modulari discretizzate (i percorsi di stampa) e organizzate in maniera specifica su varie meso-scale per ottenere grandi variazioni di forma 4DP su macro-scala. Secondo la definizione di Aristotele di 'ilemorfismo' ogni oggetto fisico è composto da materia e forma: la forma definisce il modo in cui una sostanza è organizzata o strutturata e conferisce alla materia la sua identità; materia e forma devono essere considerate un tutt'uno, non sono due oggetti indipendenti o due parti indipendenti di un tutto (Witt, 1987).

Pertanto, lavorando all'interno del quadro concettuale di Aristotele, la possibilità di ottenere una forma precisa è sempre insita nella materia; tuttavia con l'evoluzione di tecnologie e materiali sono stati introdotti altri fattori e la 4DP definisce un nuovo rapporto tra forma e materia. Le configurazioni geometriche degli oggetti responsivi stampati dipendono non solo dai materiali stessi, ma anche dall'organizzazione gerarchica e formale dell'architettura del materiale che può essere progettata con precisione. Sebbene sia difficile affermare cosa intendesse esattamente Aristotele riguardo alla relazione tra materia e forma è improbabile che lo stesso abbia considerato la natura attiva dei compositi 4DP, nei quali la forma cambia costantemente in relazione alle condizioni ambientali e al passare del tempo.

Nella progettazione di compositi 4DP i percorsi di stampa possono essere considerati come dei blocchi di costruzione utilizzati per definire un linguaggio dei materiali che, per essere tale, richiede modelli e regole in grado di mantenere l'ordine e di supportare la creazione di significato. Nella 4DP il significato può essere interpretato come la chiarezza dell'intento progettuale che si traduce in caratteristiche prestazionali misurabili, come la definizione precisa del cambiamento di forma, l'ampiezza della curvatura o il tempo di risposta più rapido al cambiamento di forma. I pattern all'interno dell'architettura del materiale sono quindi gli elementi essenziali che costituiscono quel linguaggio che, attraverso i vari modelli geometri-

ci, può informare l'osservatore sulle deformazioni igro-responsive che si verificheranno nel composito, fornendo indicazioni sulla relazione tra cambiamento di forma e tempo. Questo tipo di armonia nell'organizzazione dei materiali si trova comunemente in natura e viene pertanto ricercata anche nel design bio-ispirato (Fratzl, 2007).

La ricerca presentata sfrutta gli ampi sviluppi della scienza dei materiali, della fabbricazione digitale e della progettazione computazionale, compresa l'intelligenza artificiale e altri processi algoritmici (Bianconi and Filippucci, 2019; Bianconi et alii, 2022). La capacità di pre-programmare il materiale, la forma e il comportamento degli oggetti responsivi può portare allo sviluppo di soluzioni ispirate alla natura e realizzate con materiali di derivazione biologica, integrandole nell'architettura. Poiché uno degli obiettivi dell'architettura è creare spazi di migliore qualità sia dal punto di vista fisiologico che psicologico, l'impiego di strategie biofiliche (Fell, 2010) e di sistemi adattivi che sfruttano l'intelligenza intrinseca dei materiali piuttosto che l'elettronica (soggetta a guasti) può consentire di ottenere questi risultati.

In questo articolo si vuole, da un lato definire il ruolo dell'organizzazione dei materiali secondo pattern modulari che definiscono gli elementi costitutivi della 4DP, dall'altro presentare un esempio concreto di tale approccio progettuale. La relazione tra i moduli funzionali responsivi e la loro influenza nella programmazione delle deformazioni igroscopiche della 4DP è dimostrata attraverso la progettazione e la fabbricazione di un attuttore 4DP realizzato tramite un Composito Polimerico di Legno (WPC): la struttura a forma di fiore è differenziata funzionalmente secondo una simmetria radiale e ogni petalo è progettato con due direzioni di attuazione cinematica, pre-programmate all'interno dell'architettura del materiale. Nelle sezioni successive viene fornita una breve panoramica delle proprietà igroscopiche del legno e dei WPC in relazione alla 4DP e vengono quindi discussi il ruolo dei moduli funzionali nella programmazione del materiale e la loro influenza sulla deformazione a flessione complessiva.

L'igroscopicità del legno e dei WPC | L'igroscopicità è la capacità di un materiale di assorbire o cedere acqua da o verso l'ambiente circostante; grazie a queste proprietà il legno è considerato un materiale naturale intelligente (Ugolev, 2014) che subisce variazioni dimensionali in seguito a fluttuazioni di umidità: l'assorbimento di acqua ne provoca il rigonfiamento, mentre una diminuzione dell'Umidità Relativa (UR) fa sì che perda acqua e si restringa. Ogni specie legnosa ha i suoi tipici coefficienti di rigonfiamento e ritiro, ma si può ritenere che le maggiori deformazioni igroscopiche si verifichino sempre lungo la direzione tangenziale, che è ortogonale alla direzione delle fibre (Giordano, 1981; Holstov, Bridgens and Farmer, 2015).

Replicando la struttura a doppio strato che consente la flessione delle squame della pigna (Dawson, Vincent and Rocca, 1997; Reichert, Menges and Correa, 2015) è possibile produrre un composito a base di legno che mostri lo stesso comportamento utilizzando un materiale igroscopico come strato attivo e un materiale non igroscopico come strato passivo. Le impiallaccature di legno possono essere laminate incollando i due strati funzionali con direzioni della fibratura ortogonali, otte-

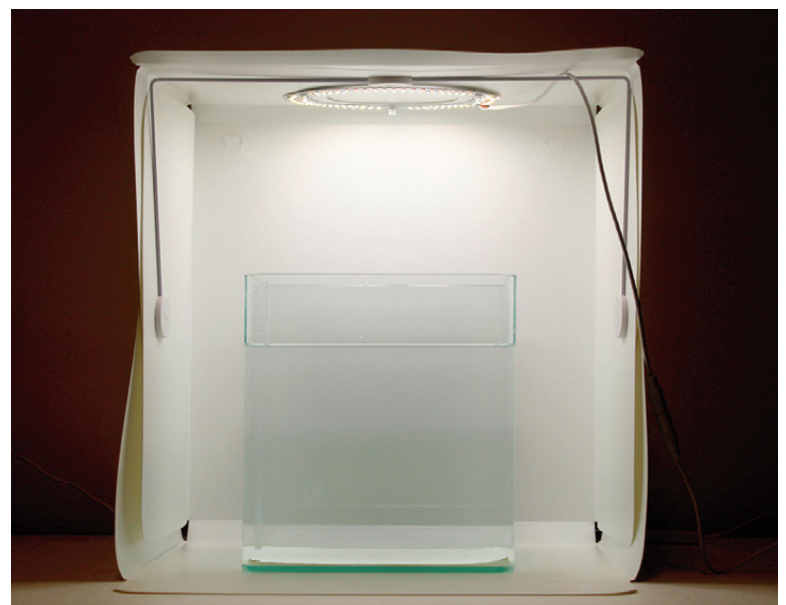
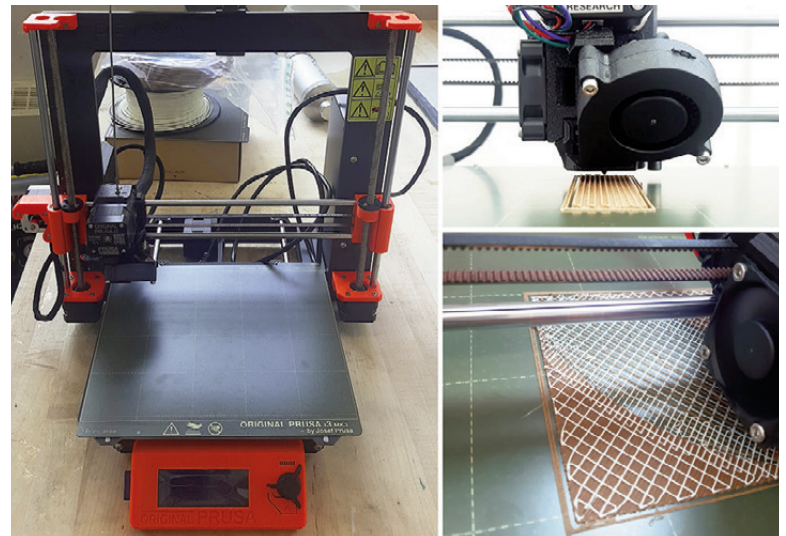
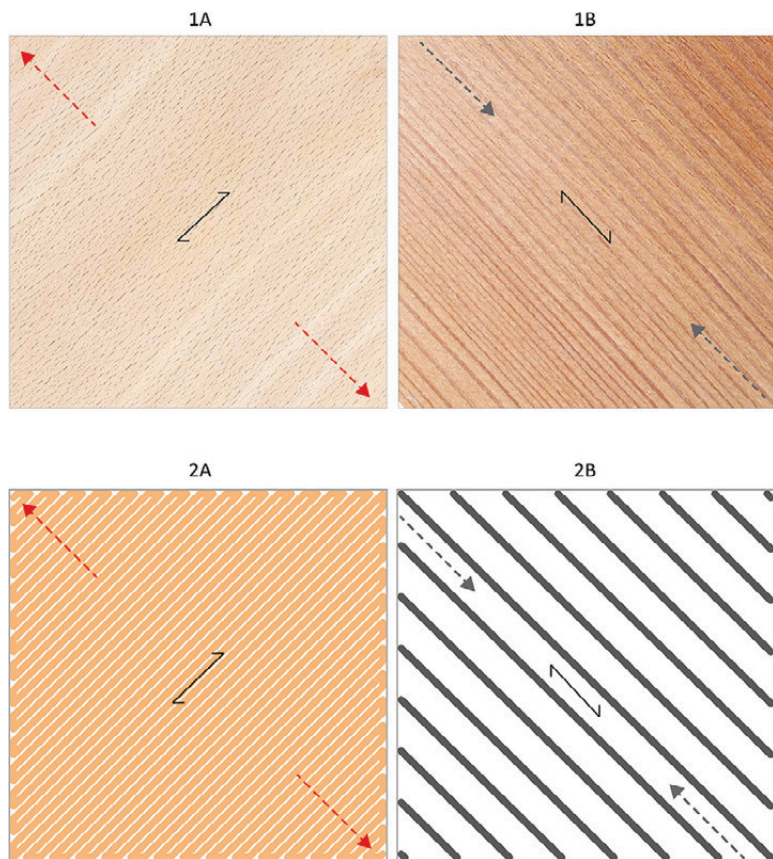


Fig. 1 | Wood laminate grain direction in the expansion (1A) and constraint layers (1B) is equivalent to 4DP WPC printing direction in both layers (2A, 2B); in both cases, the direction of expansion is perpendicular to the grain / printing direction (credit: G. Pelliccia, 2023).

Fig. 2 | A Prusa i3 MK3S+ was used for this research, with the Laywood filament as an expansion layer (credit: G. Pelliccia, 2023).

Fig. 3 | A glass box filled with water at room temperature was used to monitor the bending deformations of the 4DP actuator (credit: G. Pelliccia, 2023).

nendo una deformazione indotta dalla flessione per variazioni di UR (Rüggeberg and Burgert, 2015; Vailati et alii, 2018). Allo stesso modo tali principi possono essere trasferiti alla stampa 3D utilizzando filamenti WPC, composti da una certa quantità di farina di legno che varia tra il 20% e il 40% (Spear, Eder and Carus, 2015; Correa et alii, 2020), incorporati in un legante polimerico, solitamente Acido Polilattico – PLA (Le Duigou et alii, 2016).

La direzione del percorso di stampa nei WPC 4DP è quindi l'analogo della direzione della fibrazione nei laminati in legno e, pertanto, entrambe sono ortogonali alla direzione di espansione igroscopica (Correa et alii, 2015; Fig. 1). Tuttavia la fabbricazione di attuatori passivi tramite 3DP richiede una progettazione specifica alla scala della mesostruttura, depositando con precisione i percorsi di stampa per definire più strati funzionali e programmando così dei particolari Materiali Funzionalmente Graduati (FGM).

La struttura del legno a livello microscopico è un esempio di come la gradazione funzionale e la modularità possano influenzare direttamente le proprietà meccaniche e il comportamento complessivo del materiale. Ciò è particolarmente evidente negli anelli di crescita annuali, che hanno una composizione variabile in base ai cambiamenti stagionali, con influenze dirette sul coefficiente di

espansione igroscopica e sulle sue proprietà dipendenti dalla direzione (Dinwoodie, 2000). Le ricerche condotte sul legno di abete rosso hanno rivelato, inoltre, che il legno primaticcio presenta lumi ampi e pareti cellulari sottili e che entrambi aumentano gradualmente verso la fine dell'anello di crescita (Lanvermann et alii, 2013).

Allo stesso modo, anche l'Angolo delle Microfibrille (MFA), rispetto all'asse della fibra (Djafari Petroudy, 2017), influenza le caratteristiche del legno e il suo comportamento igroscopico: in primo luogo, quando l'angolo delle microfibrille diminuisce aumenta la rigidità della parete cellulare; in secondo luogo, il ritiro longitudinale mostra un aumento altamente non lineare con l'angolo delle microfibrille (Sheng-zuo, Wen-zhong and Xiang-xiang, 2004). Analogamente nella 4DP anche l'angolo dei modelli utilizzati per stampare i vari moduli funzionali ha un'influenza fondamentale sulle proprietà di rigonfiamento / restringimento del composito stampato. Il contenuto di lignina e l'MFA possono quindi essere considerati esempi di parametri modulari del legno che sono stati tradotti in compositi igroscopici di legno a doppio strato e in blocchi di WPC 4DP.

Il ruolo del modulo nella 4DP con WPC | Il campione presentato è stato fabbricato utilizzando

Laywoo-D3 – un WPC commerciale composto dal 40% di farina di legno (strato di espansione) – e PLA per lo strato di vincolo. I filamenti sono stati stampati utilizzando una Prusa i3 MK3S+ con un ugello di 0,4 mm di diametro, secondo la metodologia del gruppo di ricerca di Correa (Correa and Menges, 2015; Correa et alii, 2020) e sono stati successivamente monitorati in immersione (Figg. 2, 3).

Tre diversi strati con caratteristiche specifiche, considerati moduli funzionali, vengono utilizzati per realizzare l'architettura del materiale desiderata: il modulo di espansione è definito da un Raster Pattern (RP) a zig-zag in cui le linee vengono stampate in prossimità le une con le altre; per il modulo di vincolo si utilizza un RP a griglia, costituito da una serie di linee in due direzioni ortogonali la cui distanza (cioè, la densità della griglia) può essere regolata e ruotata secondo l'orientamento desiderato (ad esempio, parallela alla direzione principale o ruotata di 45°). Infine è necessario un modulo legante per migliorare l'adesione tra i moduli di espansione e di vincolo (Tahouni et alii, 2020; Correa, 2022) basato su griglie sfalsate che danno luogo a una trama interconnessa, garantendo che entrambi i materiali abbiano più punti di contatto. Lo scopo è aumentare l'efficacia dell'incollaggio tra Laywood e PLA: a

tal fine il modulo di legame viene stampato con Laywood sopra il modulo di vincolo; aderendo al Laywood sottostante negli spazi vuoti tra la griglia di PLA, quest'ultima risulta bloccata tra il modulo di vincolo e quello di espansione (Fig. 4).

I moduli funzionali possono essere stampati con configurazione verso l'alto o verso il basso. Il modulo di espansione viene stampato con configurazione verso l'alto prima che il modulo di vincolo venga sovrastampato mentre, nella configurazione verso il basso, l'ordine è invertito, con il risultato di uno spessore inferiore della griglia di PLA, che viene schiacciata sul letto di stampa. Quando il Laywood è a diretto contatto con il letto di stampa le linee RP sono più uniformi, grazie alla struttura liscia e regolare della piastra, e più grandi, a causa della pressione dell'ugello contro di esso, mentre il lato esterno del Laywood rimane più strutturato e presenta una maggiore porosità, che migliora e accelera l'assorbimento dell'acqua (Fig. 5).

La manipolazione puntuale del percorso di stampa è fondamentale per disegnare l'architettura della mesostruttura ed è quindi necessario sviluppare un algoritmo di visual scripting in Grasshopper per la progettazione e la programmazione del materiale 4DP che consente di personalizzare quelle proprietà di stampa capaci di influenzare la deformazione igroscopica finale fornendo un controllo discreto su ciascuna di esse (Fig. 6).

Pattern modulari e deformazioni dipendenti dal tempo

Sulla base dei materiali, delle attrezzature disponibili, della metodologia di fabbricazione e dei principi 4DP descritti è stato stampato un attuatore WPC a cinque bracci (Fig. 7). Analogamente a quanto riportato nella letteratura precedente sulla 4DP (Gladman et alii, 2016; Poppinga et alii, 2020), la forma a fiore è stata scelta per l'elevato rapporto di forma dei petali, una delle principali caratteristiche geometriche che influenzano sulla reattività: più una dimensione è lunga rispetto all'altra maggiore sarà la curvatura. I cinque bracci sono stati stampati con moduli funzionali alternati per ottenere concavità opposte durante la deformazione igroscopica. Inoltre ogni petalo è stato diviso in due parti uguali: quella interna è stata stampata utilizzando la configurazione verso l'alto, mentre quella esterna con la configurazione verso il basso (Fig. 8).

Il modulo di espansione è stampato in WPC, la cui espansione igroscopica è vincolata dal modulo in PLA. Pertanto dopo l'immersione in acqua, mentre il WPC inizia a espandersi ortogonalmente alla direzione del percorso di stampa, il posizionamento della griglia di PLA su un lato o sull'altro del composito determina la concavità dell'oggetto deformato. Mentre il Laywood si espande, si sviluppano tensioni di compressione sul lato del PLA, che è molto meno igroscopico e mantiene le sue dimensioni originali; la concavità del composito a doppio strato cambia così a seconda del lato sul quale viene stampato il modulo di vincolo (Fig. 9).

L'attuatore descritto è quindi stato posizionato sott'acqua nel suo stato piano e indeformato, raggiungendo la saturazione e la configurazione deformata finale dopo 60 minuti (Fig. 10). La valutazione del comportamento responsivo è stata condotta monitorando i movimenti igroscopici attraverso un video realizzato con una fotocamera fissa (Fig. 11) acquisendo una foto ogni 60 secondi per valutare

non solo la curvatura finale complessiva, ma anche la velocità di curvatura (Fig. 12).

Risultati e discussione | L'uso della stampa FDM 4D ha permesso di ottenere un controllo preciso sull'architettura del materiale e sul suo comportamento di cambiamento di forma. Attraverso la deposizione controllata del materiale è stato possibile creare dei moduli che hanno agito come blocchi di costruzione per progettare le proprietà dinamiche di cambiamento di forma, in risposta all'umidità, dell'attuatore. Le istruzioni per ogni modulo sono state pre-programmate nel materiale attraverso il processo di stampa tramite un apposito script in Grasshopper, il quale diventa quindi lo strumento di progettazione che consente un controllo meticoloso del processo di stampa e la gestione della complessa organizzazione dei modelli. Questo accurato livello di controllo è dimostrato dalla capacità di stampare due moduli a doppio strato inversi e complementari senza discontinuità lungo ciascun petalo, tenendo conto della simmetria radiale della geometria del fiore.

Dopo essere stato immerso in acqua per 15 minuti, l'attuatore ha raggiunto circa il 50% della sua curvatura massima, diminuendo poi la velocità di curvatura nei minuti successivi e raggiungendo la saturazione dopo 60 minuti. Questo processo di deformazione può essere considerato veloce rispetto ad attuatori simili analizzati in studi precedenti che invece necessitavano di almeno due ore per completare la fase di assorbimento (Correa, 2022; Bianconi et alii, 2023).

La metà interna dei petali, caratterizzata dalla configurazione verso l'alto, ha mostrato una minore responsività rispetto alla metà esterna con configurazione verso il basso. Ciò è dovuto al diverso rapporto di forma, poiché la punta della metà esterna è vincolata solo dal modulo di vincolo in PLA e può quindi piegarsi, beneficiando della sua forma affusolata, mentre la metà interna

è collegata al centro fisso dell'attuatore e ha, quindi, un rapporto di forma inferiore che produce una flessione minore rispetto alla punta del petalo. Inoltre nella metà interna si produce una doppia curvatura, dal momento che il centro fisso influenza anche sulla curvatura indotta dalla struttura a doppio strato, che diminuisce progressivamente verso la metà esterna del petalo che, essendo vincolata solo dal modulo di vincolo in PLA, mostra una curvatura singola.

Rispetto ad altre tecnologie di fabbricazione i metodi presentati beneficiano di attrezzature e materiali a basso costo; tuttavia le applicazioni di tali meccanismi in architettura presentano ancora alcune limitazioni: i WPC 4DP mostrano una maggiore responsività quando vengono immersi in acqua piuttosto che in risposta alle sole variazioni di umidità relativa (Le Duigou et alii, 2020); inoltre, quando si introducono nuovi approcci e tecnologie si possono incontrare possibili barriere culturali e sociali: gli utenti e gli architetti potrebbero sentirsi incerti su tecnologie non consolidate in termini di estetica, prestazioni, manutenzione, longevità e costi operativi complessivi.

Affrontare queste sfide richiederà una collaborazione interdisciplinare, capace di coinvolgere architetti, ingegneri, chimici, produttori e altre parti interessate; parallelamente formazione, ricerca e progetti dimostrativi potranno aiutare a superare queste sfide e a promuovere l'adozione dei compositi polimerici di legno stampati in 4D e igro-responsivi nel settore delle costruzioni.

Conclusioni | La ricerca presentata in questo articolo ha indagato e sperimentato l'applicazione innovativa della stampa FDM 4D per lo sviluppo di attuatori a cambiamento di forma complessi attraverso la manipolazione della geometria del materiale. Questo studio si colloca nel contesto più ampio della ricerca sul legno e sui suoi compositi in architettura, sfruttando i progressi della scienza

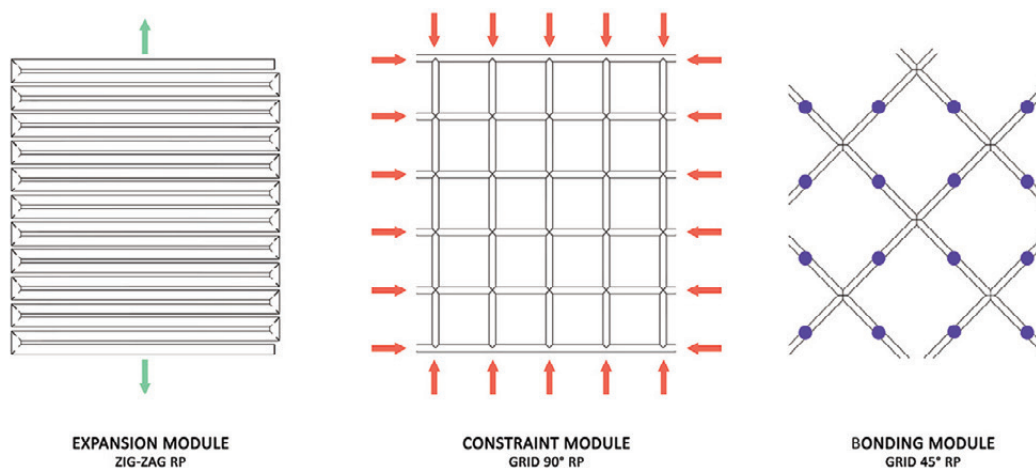


Fig. 4 | Different raster patterns were used for the various functional modules: the zig-zag RP optimizes the expansion of Laywood orthogonally to the print direction, the grid 90° RP ensures an effective constraint to the hygro-expansion of Laywood, and the grid 45° allows to bond together Laywood and PLA through multiple contact points (credit: G. Pelliccia, 2023).

Fig. 5 | The direct contact of Laywood with the print bed (A) makes the surface smoother, while the outer side (B) is textured and porous (credits: G. Pelliccia, 2023).



dei materiali, della fabbricazione digitale e della progettazione computazionale: combinando questi elementi, il lavoro presentato contribuisce a una maggiore consapevolezza degli attuatori igro-responsive 4DP a base di legno in architettura e del loro potenziale per migliorare la qualità dell'ambiente interno.

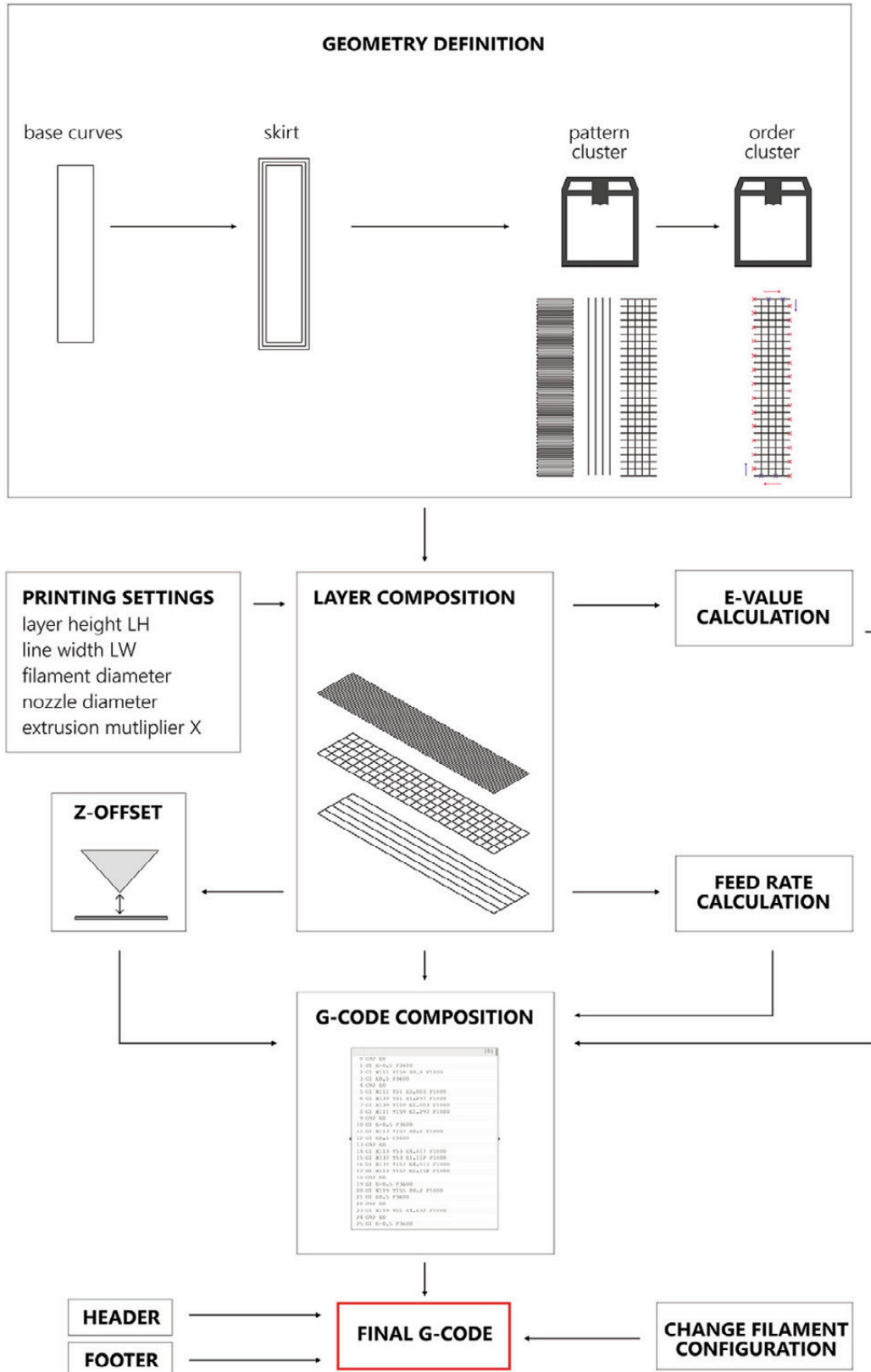
In questo articolo viene inoltre illustrata la capacità della stampa 4D con WPC di creare meccanismi responsivi con proprietà specifiche. L'approccio modulare alla progettazione di un materiale, ispirato alla natura e guidato da un controllo

preciso dei parametri di stampa, può portare a futuri progressi nello sviluppo di materiali dinamici e adattivi con applicazioni nell'architettura e nel design: ad esempio attraverso elementi e componenti per le facciate degli edifici e regolatori passivi del flusso luminoso o della ventilazione, finalizzati a migliorare l'efficienza energetica e le prestazioni senza bisogno di input elettromeccanici.

Oltre alle prestazioni tecniche i sistemi responsivi a variazione di forma di elevata complessità geometrica possono migliorare significativamente la qualità estetica degli spazi nelle applicazioni edi-

lizie, influenzando positivamente sulla percezione degli occupanti. Rispondendo ai cambiamenti ambientali in tempo reale questi sistemi possono inoltre avere un impatto sociale significativo restituendo 'visivamente' cambiamenti altrimenti invisibili nella qualità dell'aria interna, come variazioni di temperatura e umidità.

Il concetto di ilemorfismo di Aristotele, che sottolinea la relazione intrinseca tra materia e forma, è stato rivisitato in questo studio nel contesto della stampa 4D. L'architettura dei materiali svolge un ruolo cruciale nella progettazione di compositi adattivi e i pattern utilizzati nella stampa 4DP agiscono come un linguaggio che informa gli osservatori sulle deformazioni igro-responsive nel composito, fornendo essenzialmente informazioni sulla relazione tra il cambiamento di forma e il tempo e tra il clima e il tempo. Questo approccio modulare alla progettazione dei materiali si ispira alle strategie naturali di progettazione gerarchica e mira a raggiungere l'armonia, la simmetria e le proporzioni nella progettazione dei compositi tecnici.



Bio-inspired studies look at nature to find technical solutions for a multitude of research questions. From architecture to soft robotics and medicine (Poppinga et alii, 2020), the research must also look at fabrication technologies that can support the translation of those bio-inspired principles into functional applications. 3D Printing (3DP) is being increasingly used for such purposes and, thanks to a wide variety of applications (Khosravani and Reinicke, 2020) and its customizability, it is also suitable to be used in unconventional ways. Unlike ordinary industrial processes of casting, extrusion or milling, the fabrication of biological inspired materials requires the careful choreography of material architectures at multiple length scales. Through 3DP, Functionally Graded Composite Materials (FGCMs) can be fabricated, which are advanced engineered materials that exhibit a gradual and controlled variation in composition, structure, or properties over their volume (Udupa, Rao and Gangadharan, 2014). Moreover, 3DP has shown potential in the development of Smart Materials, whose properties change in reaction to external stimuli like light, heat, solvents, electric current or water (Addington and Schodek, 2005; Tibbits, 2013; Mustapha and Metwalli, 2021).

3DP based on Fused Deposition Modelling (FDM) technology is one of the most widely used methods due to its low costs and customizability (Ni et alii, 2017). FDM uses a continuous filament of a thermoplastic polymer that can be repeatedly melted when heated and solidified when cooled. FDM allows for the precise control of printing parameters (temperature, speed, extrusion, and height) and print path organization patterns (shell, infill, and printing direction) that result in the definition of direction-dependent mechanical characteristics in the resulting part (Ahn et alii, 2002).

By intentionally defining the relation of this material organization characteristics across layers, the FDM process directly enables the design of the

Fig. 6 | Workflow diagram illustrating the dedicated Grasshopper script developed to customize WPC 4D printing (credit: G. Pelliccia, 2023).

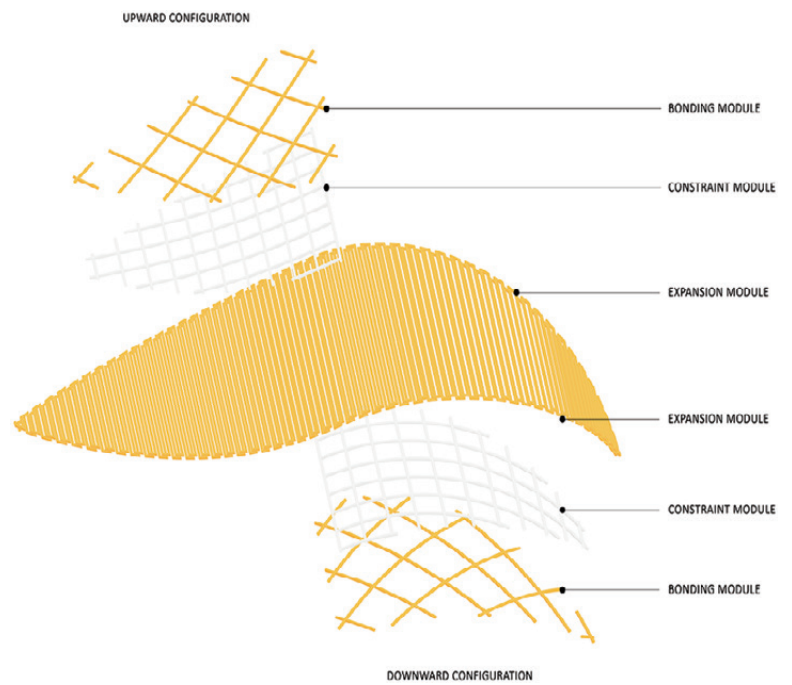
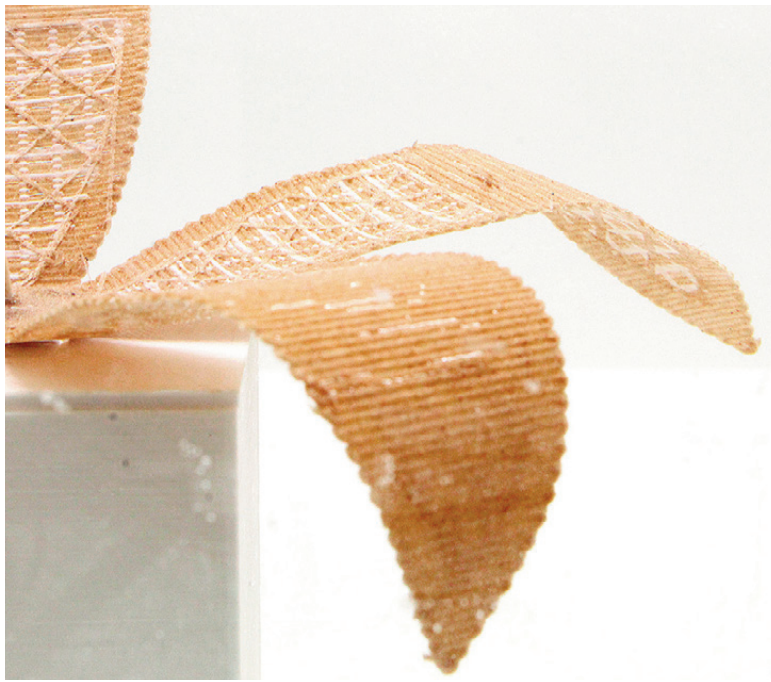


Fig. 8 | Close-up view of the deformed actuator, showing the upward and downward configurations (credit: G. Pelliccia, 2023).
Fig. 9 | The upward and downward configurations influence the concavity during the actuation (credit: G. Pelliccia, 2023).

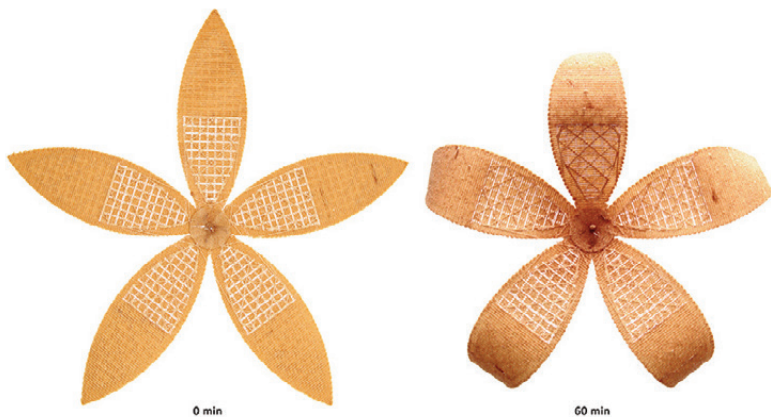


Fig. 10 | Top view of the actuator before being exposed to humidity (0 minutes) and after 60 minutes of immersion (credit: G. Pelliccia, 2023).
Fig. 11 | A fixed camera was positioned in front of the glass box to acquire one photo per minute (credit: G. Pelliccia, 2023).

tween 20% and 40% (Spear, Eder and Carus, 2015; Correa et alii, 2020) embedded in a polymer binder, usually Polylactic Acid – PLA (Le Duigou et alii, 2016).

The toolpath direction in 4DP WPCs is thus the analogue of the grain direction in wood laminates. Therefore, both are orthogonal to the direction of hygro-expansion (Correa et alii, 2015; Fig. 1). However, the fabrication of passive actuators via 3DP requires precise design at the mesostructure scale by depositing the printing paths to define multiple functional layers and programming particular Functional Graded Materials (FGMs).

Wood structure at the microscopic level is an example of how functional gradation and modularity can directly influence mechanical properties and the overall behavior of the material. This is particularly evident in the annual growth rings, which have a variable composition based on seasonal changes. The yearly growth cycle directly impacts

the coefficient of hygroscopic expansion and its direction-dependent properties (Dinwoodie, 2000).

Research conducted on spruce wood has revealed that earlywood exhibits wide lumens and thin cell walls and that both gradually increase towards the end of the growth ring (Lanvermann et alii, 2013). Similarly, the MicroFibril Angle (MFA) also influences wood characteristics and its hygroscopic behavior; MFA refers to the microfibrils' angle relative to the fiber axis (Djafari Petroudy, 2017). First, as the microfibril angle decreases, the stiffness of the cell wall increases. Second, longitudinal shrinkage exhibits a highly non-linear increase with the microfibril angle (Sheng-zuo, Wenzhong and Xiang-xiang, 2004). Similarly, in 4DP, the angle of the raster patterns used to print the various functional modules also has a key influence on the swelling / shrinking properties of the printed composite. Lignin content and MFA can, therefore, be considered examples of modular pa-

rameters in wood that have been translated into wooden hygroscopic bilayers, first, and into the building blocks of WPC 4DP, second.

The role of the module in WPC 4DP | The presented sample was fabricated using Laywoo-D3 – a commercial WPC composed of 40% wood flour (expansion layer) – and PLA for the constraint layer. The filaments were printed using a Prusa i3 MK3S+ with a 0.4 mm nozzle diameter, based on Correa et alii methodology (Correa and Menges, 2015; Correa et alii, 2020) and were successively monitored under water immersion (Fig. 2, 3).

Three different layers with specific characteristics, considered functional modules, are used to fabricate the desired material architecture. The expansion module is defined by a zig-zag Raster Pattern (RP) with close proximity between each print-path line. A grid RP is used for the constraint module, consisting of a series of lines in two or-

thogonal directions whose line distance (i.e., grid density) can be adjusted. The grid can be rotated according to the desired orientation (i.e. parallel to the main direction or rotated 45°). Last, a bonding module is needed to improve adhesion between expansion and constraint modules (Tahouni et alii, 2020; Correa, 2022). Such module is based on staggered grids, resulting in an interconnected weave pattern that ensures that both materials have multiple points of contact with each other. The purpose is to increase the bonding effectiveness between Laywood and PLA. Therefore, the bonding module is printed using Laywood above the constraint module. By adhering to the underlying Laywood in the gaps between the PLA grid, this last one results in being locked between the bonding module and the expansion one (Fig. 4).

The functional modules can be printed in an upward or downward configuration. The expansion module is printed in an upward configuration before the constraint module is overprinted. In the downward configuration, the order is reversed instead, resulting in a lower thickness of the PLA grid, which is squashed on the build plate. When Laywood is in direct contact with the print bed, the RP lines are smoother, due to the smooth and regular texture of the bed, and larger, due to the pressure of the nozzle against the print bed. Instead, the outer side of the Laywood is more textured and has an increased porosity, which improves and accelerates water absorption (Fig. 5).

A visual scripting algorithm was developed in Grasshopper for the design and material programming of the 4DP material. Precise manipulation of the print path was critical to articulate the mesostructure architecture. The developed script allows for customization of the relevant printing properties that affect the final hygroscopic deformation, giving discrete control over each (Fig. 6).

Modular patterns and time-dependent deformations | Based on the described 4DP materials, equipment, fabrication methodology, and principles, a five-arm WPC actuator was printed (Fig. 7). Similar to previous literature in 4DP (Gladman et alii, 2016; Poppinga et alii, 2020), this flower-like shape was chosen due to the high aspect ratio of the petals, which is one of the main geometric features affecting responsiveness: the longer one dimension is compared to the other, the greater the curvature will be. The five arms were printed with alternating functional modules to achieve opposite concavities during hygro-deformation. Furthermore, each petal was divided into two equal parts, of which the inner one was printed using the upward configuration, while the outer one had the downward configuration (Fig. 8).

The expansion module is printed in WPC, whose hygro-expansion is constrained by the PLA module. Therefore, after being immersed in water, the WPC starts swelling orthogonally to the tool-path direction of its zig-zag RP. During such a process, the location of the PLA grid on one side of the bilayer determines the concavity of the deformed shape. While Laywood expands, compression stresses are developed on the PLA side, which is much less hygro-responsive and keeps its original size. Therefore, the concavity of the bilayer changes whether the constraint module is printed on one side or another (Fig. 9). The actuator was positioned underwater in its flat, unde-

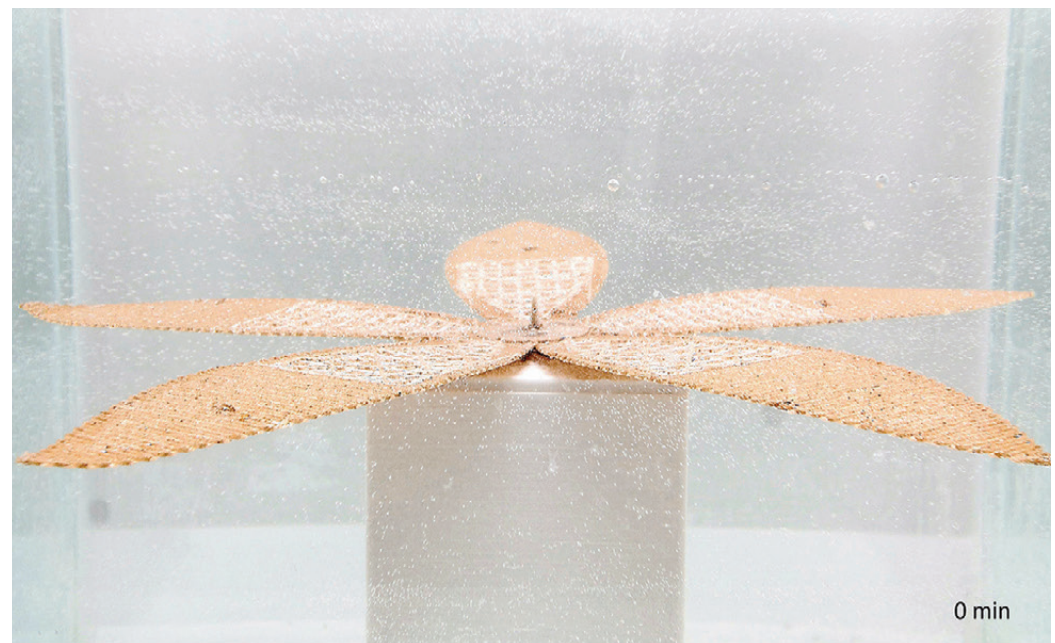


Fig. 12 | Time-lapse frames of the actuation at 0 minutes, 15 minutes, and 60 minutes (credits: G. Pelliccia, 2023).

formed state. After 60 minutes, it reached saturation and achieved its final deformed configuration (Fig. 10). The assessment of the responsive behavior was conducted by monitoring the hygroscopic motions through a fixed camera (Fig. 11). A time-lapse video was created by taking one picture every 60 seconds to evaluate not only the overall final curvature but also the velocity of curvature (Fig. 12).

Results and discussion | The use of FDM 4D printing made it possible to achieve precise control over the material architecture and its shape-change behaviour. The precise deposition of material created modules, which acted as the building blocks, to enable the design of unique dynamic shape-change properties in response to moisture. The instructions for each module were pre-programmed into the material through the printing process. A dedicated Grasshopper script becomes the design instrument that allows the accurate control of said printing process by managing the complex organization of patterns. This level of accurate control is demonstrated in the ability to print two inverse and complementary bilayer modules without discontinuities along each petal while accounting for the radial symmetry of the flower-like geometry. After being immersed in water for 15 minutes, the actuator reached around 50% of its maximum curvature. The velocity of curvature then decreased during the following minutes. Saturation was achieved after 60 minutes. This actuation can be considered fast compared to similar actuators investigated in previous studies, which instead needed at least two hours to complete the absorption phase (Correa, 2022; Bianconi et alii, 2023).

The inner half of the petals, characterized by the upward configuration, showed less responsiveness compared to the outer half with the downward configuration. This is due to the different aspect ratio since the tip of the outer half is only constrained by the constraint module and can, therefore, bend, benefiting from its tapered shape. Instead, the inner half is connected to the fixed center of the actuator and, thus, has a lower aspect ratio. This results in a minor bending compared to the tip of the petal. Moreover, the inner half also exhibits a double curvature. Such behavior occurs because the fixed center also constrains the bilayer structure. The double curvature progressively decreases toward the outer half of the petal,

which, being only constrained by the constraint module, shows a single curvature.

Compared to other fabrication technologies, the presented methods benefit from low-cost equipment and materials. However, the applications of such mechanisms in architecture still have some limitations. First, 4DP WPCs show much greater responsiveness when immersed in water rather than in response to relative humidity changes alone (Le Duigou et alii, 2020). Second, possible cultural and social barriers could be encountered when introducing new approaches and technologies. The occupants and architects might feel uncertain about the latest technology in terms of aesthetics, performance, maintenance, longevity and overall operational costs.

Addressing these challenges will require interdisciplinary collaboration, including architects, engineers, manufacturers, policymakers, and other stakeholders. Education, research, and demonstration projects can help overcome these challenges and drive the adoption of 4D printed hygro-responsive wood polymer composites in architecture.

Conclusions | The research presented in this paper investigates and positions the innovative application of FDM 4D printing to manipulate form within material to develop complex shape-change actuators. The research is situated within the broader context of wood and wood composite research in architecture, leveraging advancements in material science, digital fabrication, and computational design. By combining these elements, the study contributes towards the greater understanding of wood-based 4DP hygro-responsive actuators in architecture and their potential to improve indoor environmental quality.

This research also illustrates the capacity of WPCs 4D printing to create responsive mechanisms with unique intrinsic properties. The modular approach to material design, informed by nature and guided by precise control over printing parameters, can lead to future advancements in developing dynamic and adaptive materials with applications in architecture and design. For instance, the development of building façade applications and passive indoor airflow controllers with intrinsic response to moisture, relative humidity, or sun radiation. The increased understanding of kinematic design in these mechanisms can contribute to building, automotive or industrial appli-

cations addressing thermal control, ventilation, or shading. The 4DP components can improve energy efficiency while reducing operational costs by improving functional performance without needing external electromechanical input.

In addition to technical performance, responsive shape-change systems of high geometric complexity can significantly improve occupant comfort in building applications through visual delight. Responding to real-time environmental changes, these systems can have a significant social impact by visually representing otherwise invisible changes in indoor air quality, such as temperature and humidity. Serving as both a technical performance component and an educational tool, these 4DP mechanisms offer an integrated approach to sustainable design with a high potential for social impact.

Aristotle's concept of hylomorphism, which emphasizes the intrinsic relationship between matter and form, was revisited in the context of 4D printing. Material architecture plays a crucial role in shaping the design of adaptive composites. The patterns used in 4DP act as a language that informs observers about the hygro-responsive deformations that will occur in the composite, essentially providing information about the relationship between shape change and time and climate and time. This modular approach to material design takes inspiration from natural hierarchical design strategies and aims to achieve harmony, symmetry, and proportion in designing technical composites.

Acknowledgements

The presented work is part of the PhD research of G. Pelliccia, with the supervision of F. Bianconi, M. Filippucci and D. Correa during the XXXV cycle of the International Doctoral Program in Civil and Environmental Engineering of the University of Perugia, ended with a thesis titled 'Hygroscopic indoor design – Morphological and material programming of responsive wooden bilayers and 4D printing shape-change mechanisms'.

The contribution is the result of a common reflection of the Authors. However, the introductory paragraph is to be attributed to G. Pelliccia, D. Correa, F. Bianconi and M. Filippucci, the paragraph 'Hygroscopicity of wood and WPCs'

to G. Pelliccia and D. Correa, the paragraphs 'The role of the module in WPC 4DP', 'Modular patterns and time-dependent deformations' and 'Results and discussion' to G. Pelliccia, the paragraph 'Conclusions' to D. Correa, F. Bianconi and M. Filippucci.

References

- Addington, M. and Schodek, D. L. (2005), *Smart materials and new technologies – For the architecture and design professions*, Architectural, Oxford.
- Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P. K. (2002), "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS", in *Rapid Prototyping Journal*,

vol. 8, issue 4, pp. 248-257. [Online] Available at: doi.org/10.1108/13552540210441166 [Accessed 13 October 2023].

Bianconi, F. and Filippucci, M. (2019), "Wood, CAD and AI – Digital modelling as place of convergence of natural and artificial intelligent to design timber architecture", in Bianconi, F. and Filippucci, M. (eds), *Digital Wood Design – Innovative Techniques of Representation in Architectural Design*, Springer, Cham, pp. 3-60. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8_1 [Accessed 13 October 2023].

Bianconi, F., Filippucci, M., Pelliccia, G. and Correa, D. (2023), "Sfruttare l'intelligenza naturale del legno per migliorare la ventilazione passiva degli edifici | Harnessing the natural intelligence of wood to improve passive ventilation

- in buildings”, in *Techné | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 25, pp. 252-259. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techné-13656 [Accessed 13 October 2023].
- Bianconi, F., Filippucci, M., Pelliccia, G., Rossi, G., Tocci, T., Tribbiani, G. and Correa, D. (2022), “Low-Cost Depth-Camera – Open-source 3D displacement measurements for 4D printed hygroscopic composites”, in Nüchter, A., Grussenmeyer, P. and Kersten, T. (eds), *7th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications, 15-16 December 2022, Würzburg, Germany | The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-2/W1-2022, pp. 23-28. [Online] Available at: doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-23-2022 [Accessed 13 October 2023].
- Correa, D. (2022), *4D printed hygroscopic programmable material architectures*, University of Stuttgart. [Online] Available at: elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/12393 [Accessed 13 October 2023].
- Correa, D. and Menges, A. (2015), “3D printed hygroscopic programmable material systems”, in *Materials Research Society Online Proceedings*, vol. 1800, issue 1, article 4, pp. 24-31. [Online] Available at: doi.org/10.1557/OPL.2015.644 [Accessed 13 October 2023].
- Correa, D., Papadopoulou, A., Guberan, C., Jhaveri, N., Reichert, S., Menges, A. and Tibbits, S. (2015), “3D-Printed Wood – Programming Hygroscopic Material Transformations”, in *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 2, issue 3, pp. 106-116. [Online] Available at: doi.org/10.1089/3dp.2015.0022 [Accessed 13 October 2023].
- Correa, D., Poppinga, S., Mylo, M. D., Westermeier, A. S., Bruchmann, B., Menges, A. and Speck, T. (2020), “4D pine scale – Biomimetic 4D printed autonomous scale and flap structures capable of multi-phase movement”, in *Philosophical Transactions of the Royal Society A | Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 378, issue 2167, article 20190445, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1098/rsta.2019.0445 [Accessed 13 October 2023].
- Dawson, C., Vincent, J. F. V. and Rocca, A.-M. (1997), “How pine cones open”, in *Nature*, vol. 390, issue 6661, p. 668. [Online] Available at: doi.org/10.1038/37745 [Accessed 13 October 2023].
- Dinwoodie, J. M. (2000), *Timber – Its nature and behaviour*, CRC Press, London.
- Djafari Petroudy, S. R. (2017), “Physical and mechanical properties of natural fibers”, in Fan, M. and Fu, F. (eds), *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*, Woodhead Publishing, pp. 59-83. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0 [Accessed 13 October 2023].
- El-Dabaa, R. B., Salem, I. and Abdelmohsen, S. (2021), “Digitally Encoded Wood – 4D Printing of Hygroscopic Actuators for Architectural Responsive Skins”, in *ASCAAD 2021 | Architecture in the Age of Disruptive Technologies*, Cairo, pp. 240-252. [Online] Available at: researchgate.net/publication/350071831_DIGITALLY_ENCODED_WOOD_4D_Printing_of_Hygroscopic_Actuators_for_Architectural_Responsive_Skins [Accessed 13 October 2023].
- Fell, D. R. (2010), *Wood in the human environment – Restorative properties of wood in the built indoor environment*, PhD Dissertation, University of British Columbia, Vancouver. [Online] Available at: doi.org/10.14288/1.0071305 [Accessed 13 October 2023].
- Fratzl, P. (2007), “Biomimetic materials research – What can we really learn from nature’s structural materials?”, in *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 4, issue 15, pp. 637-642. [Online] Available at: doi.org/10.1098/rsif.2007.0218 [Accessed 13 October 2023].
- Ge, Q., Dunn, C. K., Qi, H. J. and Dunn, M. L. (2014), “Active origami by 4D printing”, in *Smart Materials and Structures*, vol. 23, issue 9, article 094007, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1088/0964-1726/23/9/094007 [Accessed 13 October 2023].
- Giordano, G. (1981), *Tecnologia del Legno – La materia prima – vol. 1*, UTET, Torino.
- Gladman, A. S., Matsumoto, E. A., Nuzzo, R. G., Mahadevan, L. and Lewis, J. A. (2016), “Biomimetic 4D printing”, in *Nature Materials*, vol. 15, issue 4, pp. 413-418. [Online] Available at: doi.org/10.1038/NMAT4544 [Accessed 13 October 2023].
- Holstov, A., Bridgens, B. and Farmer, G. (2015), “Hygro-morphic materials for sustainable responsive architecture”, in *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 570-582. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.136 [Accessed 13 October 2023].
- Khosravani, M. R. and Reinicke, T. (2020), “3D-printed sensors – Current progress and future challenges”, in *Sensors and Actuators A – Physical*, vol. 305, article 111916, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.SNA.2020.111916 [Accessed 13 October 2023].
- Lanvermann, C., Evans, R., Schmitt, U., Hering, S. and Niemi, P. (2013), “Distribution of structure and lignin within growth rings of Norway spruce”, in *Wood Science and Technology*, vol. 47, issue 3, pp. 627-641. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00226-013-0529-8 [Accessed 13 October 2023].
- Le Duigou, A. and Correa, D. (2022), “4D printing of natural fiber composite”, in Bodaghi, M. and Zolfagharian, A. (eds), *Smart Materials in Additive Manufacturing | Volume 1 – 4D Printing Principles and Fabrication Additive Manufacturing Materials and Technologies*, Elsevier, pp. 297-333. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-824082-3.00028-3 [Accessed 13 October 2023].
- Le Duigou, A., Castro, M., Bevan, R. and Martin, N. (2016), “3D printing of wood fibre biocomposites – From mechanical to actuation functionality”, in *Materials and Design*, vol. 96, pp. 106-114. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.018 [Accessed 13 October 2023].
- Le Duigou, A., Chabaud, G., Scarpa, F. and Castro, M. (2019), “Bioinspired Electro-Thermo-Hygro Reversible Shape-Changing Materials by 4D Printing”, in *Advanced Functional Materials*, vol. 29, issue 40, article 1903280, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1002/adfm.201903280 [Accessed 13 October 2023].
- Le Duigou, A., Correa, D., Ueda, M., Matsuzaki, R. and Castro, M. (2020), “A review of 3D and 4D printing of natural fibre biocomposites”, in *Materials and Design*, vol. 194, article 108911, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.MATDES.2020.108911 [Accessed 13 October 2023].
- Mustapha, K. B. and Metwalli, K. M. (2021), “A review of fused deposition modelling for 3D printing of smart polymeric materials and composites”, in *European Polymer Journal*, vol. 156, article 110591, pp. 1-29. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2021.110591 [Accessed 13 October 2023].
- Ni, Y., Ji, R., Long, K., Bu, T., Chen, K. and Zhuang, S. (2017), “A review of 3D-printed sensors”, in *Applied Spectroscopy Reviews*, vol. 52, issue 7, pp. 623-652. [Online] Available at: doi.org/10.1080/05704928.2017.1287082 [Accessed 13 October 2023].
- Poppinga, S., Correa, D., Bruchmann, B., Menges, A. and Speck, T. (2020), “Plant movements as concept generators for the development of biomimetic compliant mechanisms”, in *Integrative and Comparative Biology*, vol. 60, issue 4, pp. 886-895. [Online] Available at: doi.org/10.1093/icb/icaa028 [Accessed 13 October 2023].
- Reichert, S., Menges, A. and Correa, D. (2015), “Metrosensitive architecture – Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness”, in *Computer-Aided Design*, vol. 60, pp. 50-69. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.CAD.2014.02.010 [Accessed 13 October 2023].
- Rüggeberg, M. and Burgert, I. (2015), “Bio-Inspired Wooden Actuators for Large Scale Applications”, in *PLoS ONE*, vol. 10, issue 4, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1371/journal.pone.0120718 [Accessed 13 October 2023].
- Sheng-zuo, F., Wen-zhong, Y. and Xiang-xiang, F. (2004), “Variation of microfibril angle and its correlation to wood properties in poplars”, in *Journal of Forestry Research*, vol. 15, issue 4, pp. 261-267. [Online] Available at: doi.org/10.1007/bf02844949 [Accessed 13 October 2023].
- Shiblee, M. N. I., Ahmed, K., Kawakami, M. and Furukawa, H. (2019), “4D Printing of Shape-Memory Hydrogels for Soft-Robotic Functions”, in Ansell, M. P. (ed.), *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, issue 8, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1002/admt.201900071 [Accessed 13 October 2023].
- Spear, M. J., Eder, A. and Carus, M. (2015), “Wood polymer composites”, in *Wood Composites*, pp. 195-249. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-1-78242-454-3.00010-X [Accessed 13 October 2023].
- Tahouni, Y., Cheng, T., Wood, D., Sachse, R., Thierer, R., Bischoff, M. and Menges, A. (2020), “Self-shaping Curved Folding – A 4D-printing method for fabrication of self-folding curved crease structures”, in Whiting, E., Hart, J., Sung, C., Peek, N., Akbarzadeh, M., Aukes, D., Schulz, A., Taylor, H. and Kim, J. (eds), *Proceedings SCF 2020 – ACM Symposium on Computational Fabrication*, Machinery, New York, article 5, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1145/3424630.3425416 [Accessed 13 October 2023].
- Tahouni, Y., Krüger, F., Poppinga, S., Wood, D., Pfaff, M., Rühle, J., Speck, T. and Menges, A. (2021), “Programming sequential motion steps in 4D-printed hygro-morphs by architected mesostructure and differential hygro-responsiveness”, in *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 16, issue 5, article 055002, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1748-3190/ac0c8e [Accessed 13 October 2023].
- Tibbits, S. (2013), “The emergence of 4D printing”, in *TED conference*. [Online] Available at: youtube.com/watch?v=0gMCZFHv9v8 [Accessed 13 October 2023].
- Timoshenko, S. (1925), “Analysis of Bi-Metal Thermostats”, in *JOSA | Journal of Optical Society of America*, vol. 11, issue 3, pp. 233-255. [Online] Available at: doi.org/10.1364/JOSA.11.000233 [Accessed 13 October 2023].
- Tomec, D. K., Straže, A., Haider, A. and Kariz, M. (2021), “Hygro-morphic Response Dynamics of 3D-Printed Wood-PLA Composite Bilayer Actuators”, in *Polymers*, vol. 13, issue 19, article 3209, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.3390/POLYM13193209 [Accessed 13 October 2023].
- Udupa, G., Rao, S. S. and Gangadharan, K. V. (2014), “Functionally Graded Composite Materials – An Overview”, in *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 1291-1299. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.442 [Accessed 13 October 2023].
- Ugolev, B. N. (2014), “Wood as a natural smart material”, in *Wood Science and Technology*, vol. 48, issue 3, pp. 553-568. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00226-013-0611-2 [Accessed 13 October 2023].
- Vailati, C., Bachtar, E., Hass, P., Burgert, I. and Rüggeberg, M. (2018), “An autonomous shading system based on coupled wood bilayer elements”, in *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 1013-1022. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.10.042 [Accessed 13 October 2023].
- Witt, C. (1987), “Hylomorphism in Aristotle”, in *The Journal of Philosophy*, vol. 84, issue 11, pp. 673-679. [Online] Available at: doi.org/10.5840/jphil1987841116 [Accessed 13 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	12 September 2023
Revised	16 October 2023
Accepted	22 October 2023
Published	31 December 2023

IL DESIGN MODULARE VERSO L'ECONOMIA CIRCOLARE

Dal 'fare per disfare' al 'fare per rifare'

MODULAR DESIGN TOWARDS THE CIRCULAR ECONOMY

From 'making to unmake' to 'making to remake'

Lucia Pietroni, Alessandro Di Stefano, Daniele Galloppo

ABSTRACT

Alla luce del recente dibattito sulla transizione verso l'Economia Circolare le strategie di Design for Modularity assumono un ruolo determinante nel processo di trasformazione dell'attuale modello economico da lineare a circolare. Attraverso la descrizione di alcuni casi-studio di prodotti modulari, recentemente sviluppati, l'articolo intende tratteggiare la riflessione, sviluppata nell'ambito della cultura del design per la sostenibilità, sul concetto di modularità che, negli ultimi anni, è passata dalla logica industriale del 'fare per disfare', ovvero, concepire prodotti modulari e disassemblabili soprattutto per riciclarne i materiali a fine vita, alla logica del 'fare per rifare', al fine di incrementare la loro circolarità e durabilità, rendendoli riutilizzabili, riparabili e rifabbricabili. L'obiettivo del contributo è riesaminare il concetto di 'modularità' nello scenario dell'Economia Circolare, quale leva strategica progettuale per allungare la vita utile dei prodotti industriali.

Given the recent debate regarding the transition to the Circular Economy, Design for Modularity strategies play a decisive role in the process of transforming the current economic model from linear to circular. By describing some recently developed modular product case studies, this article intends to outline the considerations developed in the field of design culture for sustainability, on the concept of modularity. In recent years, this has shifted from the industrial logic of 'making to unmake', namely designing modular and disassemblable products mainly to recycle their end-of-life materials, to the logic of 'making to remake', to increase their circularity and durability, thereby making them reusable, repairable and re-manufacturable. The objective of this contribution is to re-examine the concept of 'modularity' in the Circular Economy scenario, as a strategic design lever to extend the useful life of industrial products.

KEYWORDS

design modulare, economia circolare, riparabilità, rifabbricabilità, durabilità

modular design, circular economy, reparability, re-manufacturability, durability

Lucia Pietroni is a Full Professor of Industrial Design at the SAAD of the University of Camerino (Italy), where she is the Director of the Master in Eco-design & Eco-innovation. She is a founding member of SID (Italian Design Society) and a member of the Board of Directors since 2018; she has served as President of EcodesignLab Srl, a spin-off of UniCam, since 2013. Her main research areas are sustainable and bio-inspired design, design for safety, and design-led innovation processes. E-mail: lucia.pietroni@unicam.it

Alessandro Di Stefano, Designer, is a PhD Candidate in Innovation Design at SAAD, University of Camerino (Italy). His research focuses on circular design as well as the potential of digital fabrication through the investigation of critical production, technical and aesthetic issues in industrial design. E-mail: alessandro.distefano@unicam.it

Daniele Galloppo, Designer, is a Researcher in Industrial Design at SAAD, University of Camerino (Italy). He conducts research mainly in the field of design for environmental sustainability, focusing on the contribution made by innovative materials and production processes for the evolution of industrial products and on the Design for Safety. He is a founding member of EcodesignLab Srl as of 2013. E-mail: daniele.galloppo@unicam.it



L'articolo ha l'obiettivo di ridiscutere i concetti di 'modularità' e di 'design modulare' alla luce del recente dibattito sulla transizione verso l'Economia Circolare che, nel riconoscere un ruolo strategico alla progettazione nella trasformazione dell'attuale modello economico da lineare a circolare, evidenzia l'importanza del design modulare quale strategia progettuale per allungare la vita utile dei prodotti, rendendoli riutilizzabili, manutenibili, riparabili, aggiornabili e rifabbricabili (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Charter, 2018).

La prima parte del contributo affronta il concetto di Design for Modularity (DfM) nella cultura imprenditoriale e progettuale del 'fare per disfare', ossia di prodotti disassemblabili concepiti soprattutto per recuperare e riciclare i materiali a fine vita. La seconda parte si focalizza sulla descrizione di tre casi-studio di prodotti modulari, recentemente sviluppati, per rilevare le strategie di DfM sviluppate a favore di una logica del 'fare per rifare', ossia per concepire prodotti sostenibili secondo i criteri dell'Economia Circolare. Attraverso la revisione della letteratura e la descrizione dei casi-studio, l'articolo intende tratteggiare la riflessione attuale, sviluppatasi nell'ambito della cultura del design per la sostenibilità, sul concetto di modularità come strategia per incrementare la circolarità e la durabilità dei prodotti, in particolare in riferimento ai radicali cambiamenti del sistema di produzione e consumo necessari per realizzare la transizione verso l'Economia Circolare (Lacy and Rutqvist, 2015; van der Berg and Bakker, 2015).

Fin dagli anni '90 gli studiosi che si sono occupati di Eco-design o Design per la Sostenibilità ambientale hanno definito e approfondito le strategie di Design for Disassembling (DfD) per facilitare in via prioritaria il riciclo dei componenti e dei materiali di un prodotto (Keoleian and Menerey, 1994; Manzini and Vezzoli, 1998; Bryant et alii, 2004; Machado and Morioka, 2021). L'architettura dei prodotti, soprattutto quelli a elevata complessità, veniva rivista e semplificata lavorando sulla modularità del prodotto come strategia di standardizzazione per generare piattaforme produttive che, da un numero limitato di componenti, potessero sviluppare differenti configurazioni di prodotti finiti (Ulrich, 1994; Miller and Elgård, 1998; Bordignon, 2009; Yan and Feng, 2013, Crippa et alii, 2023).

Le soluzioni di DfM, inoltre, consentivano di razionalizzare costi e tempi di produzione, di incrementare la flessibilità produttiva e la personalizzazione dei prodotti, di ridurre il consumo di risorse e migliorare notevolmente le possibilità di disassemblaggio delle componenti e il riciclo dei materiali a fine vita (Jacobs, Vickery and Droge, 2007; Umeda et alii, 2008). In questi anni, la concezione modulare dei prodotti, anche attraverso la realizzazione di progetti pilota di piattaforme di disassemblaggio (elettrodomestici, automobili, ecc.), ha rappresentato una strategia capace di coniugare benefici ambientali ed economici, facendo crescere una cultura imprenditoriale e progettuale del 'fare per disfare' e consentendo di sviluppare un importante know how sui processi di riciclo, sui materiali riciclati e sulle loro prestazioni.

Oggi, nella transizione verso l'Economia Circolare, il design modulare acquista nuova importanza come strategia progettuale per ridurre drasticamente la produzione di rifiuti, concependo prodotti in un'ottica di 'fare per rifare' che possano

essere disassemblati, in primo luogo per allungarne la vita utile e, solo in ultima istanza, per riciclare i loro materiali valorizzandoli in materie seconde di elevata qualità (van der Berg and Bakker, 2015; Sonogo, Echeveste and Debarba, 2018). Pertanto, considerato il nuovo modello economico, la modularità dei prodotti deve essere concepita per essere funzionale alla strategia delle 3R, Ridurre / Riusare / Riciclare, ovvero minimizzare la produzione di rifiuti, riusare il maggior numero di componenti rendendo i prodotti riparabili, manutenibili, aggiornabili, rifabbricabili e, infine, riciclabili.

In questo nuovo scenario, in cui le strategie progettuali prioritarie sono legate alla durabilità dei prodotti, la modularità diventa un requisito fondamentale per trasformare la 'fase di uso' in riuso, manutenzione, riparazione e la 'fase di produzione' in aggiornamento / rinnovamento e rifabbricazione (Soh, Ong and Nee, 2014; Machado and Morioka, 2021). Di seguito vengono discussi gli approcci di DfM, evidenziandone i benefici e i possibili sviluppi nella trasformazione dell'attuale modello economico da lineare a circolare, in quanto strategia progettuale significativa per l'allungamento della vita dei prodotti, per l'incremento della loro intensità d'uso, per lo sviluppo di nuovi modelli di business circolari che consolidino una cultura imprenditoriale del 'fare per rifare' e non solo del 'fare per disfare'.

La modularità per 'disfare' | Sin dall'inizio dell'industrializzazione la progettazione orientata alla modularità, generata attraverso un processo di standardizzazione e razionalizzazione dei moduli, ha rappresentato una strategia efficace per aumentare l'efficienza produttiva e la competitività delle imprese. La modularità rappresenta infatti un principio di progettazione di fondamentale importanza, sia per rispondere alla 'personalizzazione di massa', in cui una vasta gamma di prodotti è ottenuta combinando moduli standardizzati e gestiti in piattaforma (Miller and Elgård, 1998; Baldwin and Clark, 1999; Bask et alii, 2010) sia, specialmente oggi, per facilitare il disassemblaggio delle componenti e il riciclaggio a fine vita dei materiali (Bordignon, 2009; Ijomah et alii, 2010; Mital et alii, 2014). Alla fine degli anni '90 Salhieh e Kamrani (1999) presentano un modello di progettazione per la modularità, che considera tanto la scomposizione delle funzioni dei prodotti quanto la creazione di piattaforme, ovvero varietà dello stesso prodotto costruite attorno a un'unità centrale di base alla quale possono essere aggiunti moduli diversi. Tale approccio, definito anche con il concetto di 'commonality', propone un modulo come un'unità funzionale essenziale che ha una propria autonomia rispetto al prodotto del quale è parte: la sua sostituzione con un altro crea una nuova variante di prodotto e favorisce la formazione di famiglie sviluppate attorno a una piattaforma specifica (Sanderson and Uzumeri, 1997; Abdullah, Kamaruddin and Ripin, 2008).

La modularità, dunque, è funzionale all'ottimizzazione di prodotti e componenti, favorisce il perfezionamento continuo e l'adattabilità alle mutevoli esigenze espresse dal mercato e dagli utenti ed è fortemente correlata allo scenario di fine vita. L'intersezione tra modularità e sostenibilità è stata oggetto di diversi studi come quello svolto negli Stati Uniti nel 2004 da un gruppo di ingegneri che si è focalizzato sulla progettazione di metodi mirati

a integrare la sostenibilità ambientale nello sviluppo dei prodotti sviluppando il concetto di modularità nel loro intero ciclo di vita (Bryant et alii, 2004). L'obiettivo era ottimizzare la sostenibilità attraverso un approccio modulare che considerasse la facilità di riciclo, lo smontaggio agevole e la riduzione delle risorse impiegate fin dalla fase di sviluppo.

In un altro studio condotto da Newcomb, Bras e Rosen (1998) l'attenzione è stata rivolta al legame tra progettazione modulare e ciclo di vita dei prodotti con l'obiettivo di sviluppare architetture che fossero in grado di ridurre gli impatti ambientali. La loro ricerca partiva dall'assunto che l'architettura di un prodotto gioca un ruolo cruciale nel determinare aspetti quali l'assemblaggio, lo smontaggio, il riciclo e il servizio al termine della vita utile del prodotto. Un elevato indice di modularità può portare, dunque, sia a un significativo contributo in termini di riciclo e recupero dei materiali che a una sensibile riduzione dei costi legati all'assemblaggio, allo smontaggio e alla manutenzione. Pertanto, per la cultura del design sostenibile, fin dagli anni '90, la modularità ha rappresentato un requisito di prodotto fondamentale per consentire il disassemblaggio e il riciclo dei componenti, ovvero un concetto-chiave per incrementare la cultura del 'fare per disfare'.

La modularità per 'rifare' | Come già evidenziato la modularità non è, quindi, un concetto nuovo nel mondo del design industriale, ma oggi sta assumendo una nuova caratterizzazione. Oltre all'interfaccia e alla componibilità tradizionali l'accento è posto sull'abilità di aggiornare, riparare e sostituire parti non più funzionanti, nonché sull'implementazione di funzionalità più avanzate in alcune parti per aumentare la vita utile del prodotto specialmente nei prodotti elettronici. In questo contesto le componenti o i moduli diventano elementi chiave di un concetto di modularità orientato al 'rifare'. Questa nuova visione è emersa nella transizione da un paradigma di progettazione per la disassemblabilità a un paradigma di progettazione per la rifabbricazione (van der Berg and Bakker, 2015).

La base teorica di questo nuovo approccio alla progettazione si è sviluppata attraverso una revisione e un aggiornamento della letteratura tecnico-scientifica, che ha identificato nuovi criteri e parametri chiave. Questi criteri delineano la creazione di prodotti modulari che non solo sono efficienti dal punto di vista della produzione, ma anche nelle fasi d'uso e di dismissione, in quanto la loro modularità è funzionale all'allungamento della loro vita utile. Ogni modulo è studiato con una durata programmata affinché i prodotti siano facilmente disassemblabili per riutilizzarne le componenti più durevoli, aggiornarne la funzionalità, rifabbricarne le parti con una più breve durata.

Il principio alla base di questo approccio al design modulare è che riusare / rifabbricare è più sostenibile di riciclare. Pertanto, si inizia ad affermare una cultura progettuale del 'fare per rifare', che modifica in modo particolare la fase d'uso del prodotto e incentiva modelli di business basati sui servizi di manutenzione, riparazione e rifabbricazione. In questo nuovo scenario si evidenziano due aspetti principali della modularità: uno orientato all'utente e l'altro orientato all'azienda. La modularità per una riparazione fatta dall'utente consente ai consumatori di effettuare semplici interventi

di manutenzione e riparazione sui loro prodotti; dall'altra parte c'è la modularità a favore dell'azienda, che consente di ritirare i prodotti, aggiornarli e rimetterli sul mercato, come prodotti ricondizionati e rigenerati, contribuendo così a estendere il loro ciclo di vita.

Il contesto d'utilizzo e la durata utile del prodotto determinano la strategia DfM da perseguire, infatti, nella progettazione di prodotti manutenibili e ricondizionabili o rifabbricabili viene data priorità al disassemblaggio non distruttivo, mentre il disassemblaggio distruttivo si dimostra più adeguato in ottica di riciclo: la tipologia e la qualità del processo di disassemblaggio o, meglio, delle connessioni e degli elementi di fissaggio, diventa determinante per il fine vita e merita pertanto particolare attenzione (Peeters et alii, 2012; Mital et alii, 2014).

Gli autori van der Berg e Bakker (2015) sottolineano l'importanza del concetto di 'remake' nell'ambito della circolarità dei prodotti, termine che comprende una serie di azioni intraprese quando un prodotto ritorna dal cliente all'azienda, contribuendo così a renderlo effettivamente circolare. Affinché si possano generare le condizioni per lo sviluppo di prodotti modulari per il remake, i moduli devono essere progettati in modo da consentire riparazioni e aggiornamenti efficaci, il che implica l'adozione di interfacce standardizzate e l'implementazione di connessioni reversibili.

Oltre ai criteri di progettazione dei moduli occorre ripensare, all'interno del processo industria-

le e della filiera, a nuovi servizi di supporto per il mantenimento e la durabilità delle prestazioni del prodotto, adottando sistemi di controllo come la prognostica e la diagnostica (ovvero la valutazione dell'affidabilità residua dei componenti) e sviluppando la logistica 'inversa', ossia il recupero da parte delle aziende dei prodotti o dei moduli per procedere con la loro riparazione o rifabbricazione. Pertanto, negli ultimi anni, nella transizione verso l'Economia Circolare, le pratiche progettuali riferite al DfM si focalizzano sull'obiettivo di 'fare per rifare' al fine di incrementare la circolarità e la durabilità dei prodotti, oltre che la loro riciclabilità.

Nei paragrafi successivi vengono analizzati e discussi tre casi studio di prodotti contemporanei, appartenenti a differenti settori merceologici, progettati e realizzati con particolare attenzione ai criteri di modularità e disassemblabilità, al fine di renderli facilmente smontabili, riparabili, aggiornabili, personalizzabili, rifabbricabili, in linea con gli obiettivi di circolarità.

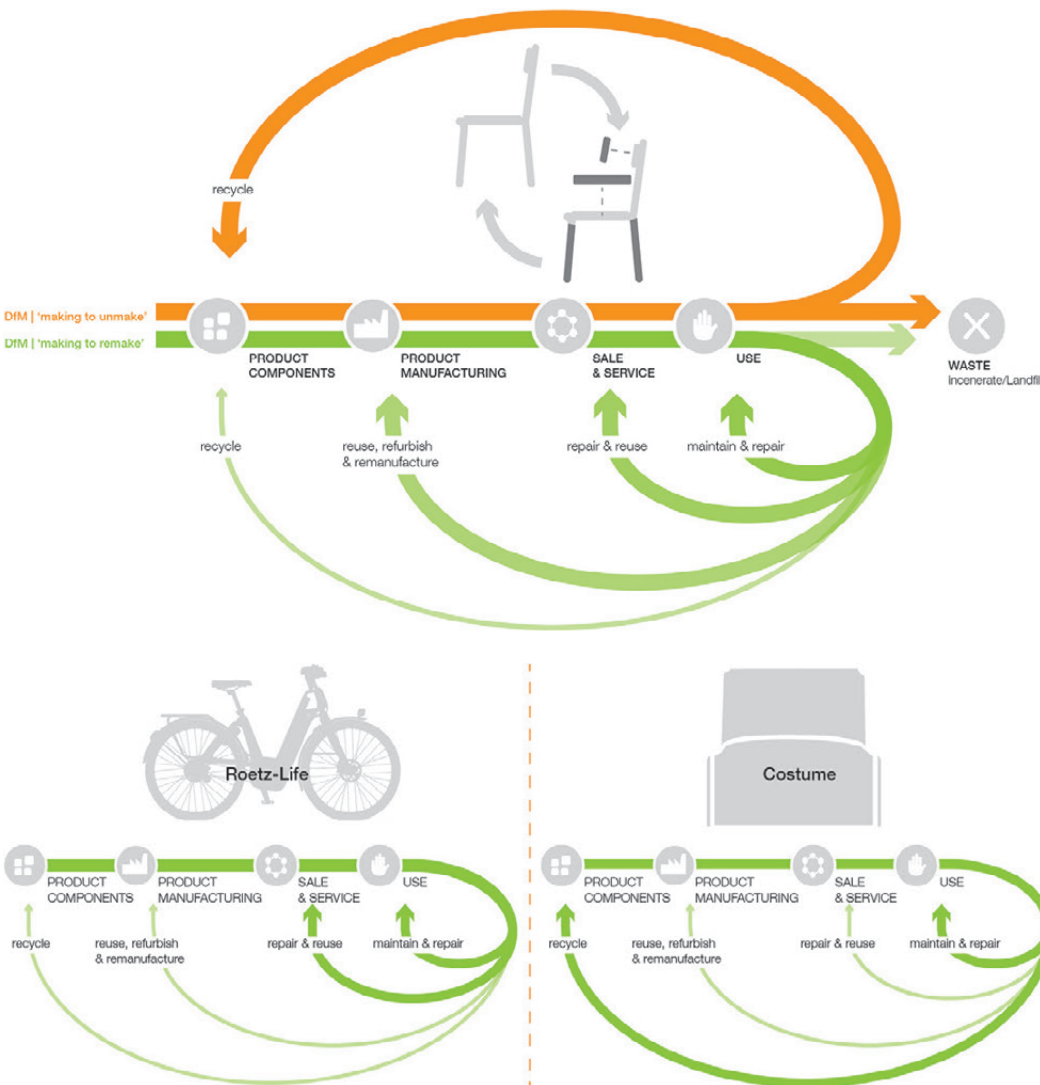
I prodotti sono stati selezionati in base ad anno e Paese di produzione, individuando prodotti recenti di non oltre 5 anni e realizzati in diversi Paesi, al loro essere concepiti a piattaforma e all'impiego di strategie DfM finalizzate a riparare e aggiornare, incrementare la durabilità tecnica ed estetica, riutilizzare e rifabbricare. I casi studio identificano approcci differenti alla circolarità che vanno ben oltre la riciclabilità dei materiali attraverso un utilizzo del design modulare per l'allungamento

della vita utile dei prodotti e/o dei loro componenti (Figg. 1, 2).

La bicicletta Roetz Life: la modularità per incrementare la riparazione e l'upgrading

Nel nord Europa la mobilità urbana sostenibile, attraverso l'ampio utilizzo di biciclette e di servizi ad esso connessi, è da molti anni entrata a far parte della cultura locale e della quotidianità, sebbene ogni anno più di un milione di biciclette diventa rifiuto e talvolta senza essere mai state utilizzate (Bakker et alii, 2017). In risposta a ciò l'azienda olandese Roetz-Bikes ha sviluppato Roetz Life, un concetto di bicicletta elettrica customizzabile e 'circolare' per durare nel tempo e ridurre drasticamente il rischio di generare scarti e rifiuti (Fig. 3). L'architettura della Roetz Life (Fig. 4) si articola in cinque moduli assemblati secondo una precisa gerarchia: il modulo telaio (a); il modulo batteria (b); il modulo ruota (c); il modulo di trasmissione (d); il modulo freni (e).

L'approccio DfM adottato nello sviluppo di Roetz Life è orientato soprattutto a generare un prodotto configurato per essere facilmente manutenibile e aggiornabile nel tempo, attraverso il canale di vendita dell'azienda e un servizio di supporto alla manutenzione per incentivare riparazione e riutilizzo delle componenti. Il cuore del progetto è il design altamente innovativo del telaio (Fig. 5), pensato come scheletro modulare in cui tutti i componenti sono interconnessi in modo reversibile così da poter essere disassemblati e so-



Figg. 1, 2 | The first diagram depicts the pattern of material and component flow according to the two different approaches of DfM, the traditional 'making to unmake' approach oriented toward recyclability, and the 'making to remake' approach oriented toward the development of durable and circular products that are easily maintained, reusable, remanufacturable, and ultimately recyclable (credit: UniCam). The second image refers to the analysed case studies: for each product, it is possible to identify the main end-of-life scenarios optimised by DfM strategies, highlighted by the flows of materials and components that fall within certain stages of the production process (credit: UniCam).

Next page

Figg. 3, 4 | Roetz Life modular electric bicycle, urban-bike version; Components and main modules (frame 'a'; battery 'b'; wheel 'c'; transmission 'd'; brakes 'e') that make up the architecture of the bicycle (credits: Roetz-Bikes).

stituiti indipendentemente dallo stato di usura o danneggiamento degli altri.

I principali criteri progettuali che hanno condotto alla definizione dell'architettura del prodotto sono stati: la realizzazione di un telaio monolitico che integra alcune componenti (ad esempio i tubi per il manubrio e il sellino), accoglie i moduli e gli accessori e si presta alla customizzazione e alla coverizzazione; la scelta di lasciare a vista gli snodi e la minuteria, per far comprendere all'utente in modo più intuitivo dove e come disassemblare le parti; l'esclusione di componenti saldate e la sostituzione con sistemi di accoppiamento per incastro e con minuteria standard (specialmente per il modulo batteria e trasmissione); la realizzazione di sistemi di connessione reversibili che offrono la possibilità all'utente di riparare o sostituire delle componenti per cambiare e ampliare le prestazioni del prodotto, ad esempio per passare dalla versione 'urban' alla versione per il 'delivery' (Fig. 6); l'implementazione di una serie di sensori che conferiscono 'intelligenza' al prodotto per permettere un monitoraggio continuo dello stato di usura delle parti più sollecitate.

Sebbene il concetto DfM per il prodotto Roetz rappresenti un caso virtuoso di circolarità, si segnala la criticità del servizio di manutenzione offerto: oltre ad essere poco chiare le sue modalità di fruizione, il servizio è ancora vincolato all'area geografica di residenza dell'azienda, aspetto questo che limita la possibilità di estendere la riparazione della e-bike, e di conseguenza anche la sua commercializzazione, in altri Paesi.

La poltrona Costume: la modularità per incrementare la durabilità tecnica e estetica | Se in passato il concetto di durabilità era un assunto base per molti prodotti, oggi, dopo anni di affermazione dell'obsolescenza programmata, tornare a creare prodotti 'senza tempo' è quasi una rivoluzione, specialmente nei settori abbigliamento e arredo, dove all'obsolescenza tecnica accelerata si aggiunge obsolescenza estetica dei prodotti indotta dalle mode e dai trend. Tuttavia, si sta cercando di invertire questa tendenza 'usa e getta' che si è affermata nel settore arredo.

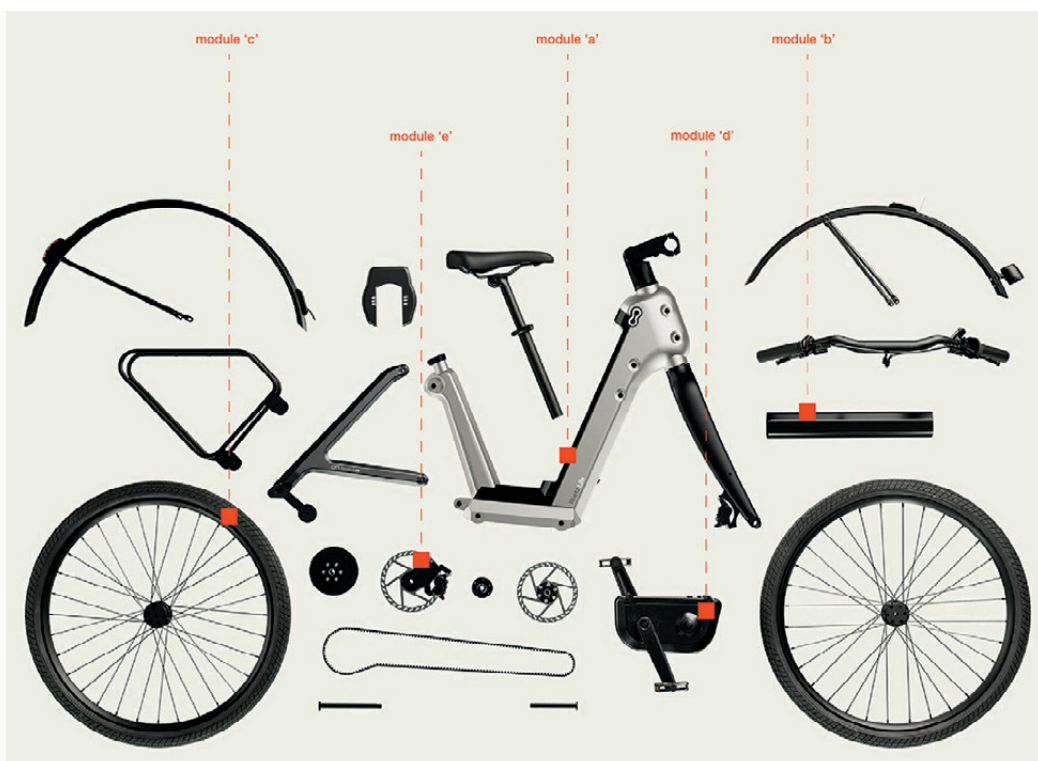
Un caso studio molto interessante di arredo che utilizza il design modulare per frenare l'obsolescenza tecnica ed estetica e incrementare la durabilità del prodotto è la poltrona Costume, nata dalla collaborazione tra l'azienda Magis e il designer Stefan Diez, secondo il quale l'arredo può essere paragonato al sistema dell'alfabeto, dove la corretta articolazione delle lettere o dei moduli produce frasi, storie e progetti differenti. Il linguaggio progettuale del sistema componibile Costume rispecchia perfettamente questa filosofia progettuale, reinterpretando il tradizionale modo di costruire le poltrone in un processo di componibilità utile alla circolarità.

La poltrona Costume, e in particolare la versione Armchair (Figg. 7, 8), è stata concepita secondo un'architettura modulare semplificata di quattro unità ('a'+ 'b'+ 'c'+ 'd'), in grado di generare un sistema componibile, manutenibile e aggiornabile, che offre la possibilità all'utente finale di riconfigurare e personalizzare il prodotto con facili operazioni di disassemblaggio e assemblaggio.

Il modulo 'a', il nucleo della poltrona, è un corpo realizzato in polietilene riciclato con la tecnologia dello stampaggio rotazionale, ideato per sem-

plificare le fasi di montaggio e accogliere gli altri moduli attraverso incastri e giustapposizioni. Il sedile è generato dall'accoppiamento di un inserto in molle (il modulo 'b') e uno strato di poliuretano (il modulo 'c'): questa soluzione non solo utilizza molta meno schiuma rispetto ai divani convenzionali, ma è facilmente disassemblabile per permettere il riciclo a fine vita; la parte morbida della poltrona è completata dal modulo 'd', un rivestimento in tessuto che all'occorrenza può essere rimosso, tramite quattro anelli elastici allacciati al nucleo (Fig. 9). Un'altra grande innovazione di Costume è la creazione e l'utilizzo di altre due unità, il 'bracciolo' e il 'connettore di plastica' (Fig. 10), che in-

sieme agli altri moduli permettono di generare un sistema a piattaforma con diverse possibilità di configurare le versioni previste dalla collezione (Fig. 11). Nella maggior parte dei casi, i divani sono prodotti di arredo composti da molti materiali uniti tra loro in modo irreversibile, rendendo quasi impossibile la riparazione di parti usurate e il riciclo dei vari componenti. Diversamente, l'approccio DfM adottato nello sviluppo di Costume intende incrementare la durabilità e ridurre l'obsolescenza estetica e tecnica attraverso due criteri progettuali: l'estrema semplificazione dell'architettura del prodotto e lo sviluppo di un sistema di disassemblaggio 'user friendly'.



Tuttavia nonostante l'elevato indice di disassemblabilità del prodotto, che ne consente sia una buona manutenibilità che aggiornabilità estetica, non è stato sviluppato un servizio ad hoc per il recupero ed il riutilizzo dei moduli: lo scenario di fine vita di Costume, ossia il riciclo delle componenti, è ancora di responsabilità dell'utente finale, mentre l'attivazione di un servizio come questo aggiungerebbe valore all'intera filiera, incentivando il cambiamento verso un modello circolare e più sostenibile (Fagnoni and Olivastri, 2019).

Il notebook Concept Luna: la modularità per incrementare la rifabbricazione | La maggior parte dei prodotti elettronici di consumo sono realizzati secondo un principio di obsolescenza programmata dei componenti e con una precisa durata della loro vita utile. Inoltre, quasi sempre, il consumatore finale si trova ad avere la responsabilità della fine vita di questi prodotti difficili da disassemblare per un corretto riciclo, nonostante esista una Direttiva Europea che definisce la Responsabilità Estesa del Produttore (European Parliament and the Council of the European Union, 2018). Infatti, negli ultimi anni, alcune delle grandi aziende di elettronica stanno ripensando i loro prodotti per estenderne la vita utile, specialmente attraverso i servizi di riparazione e ricondizionamento. Tra queste la Dell sta sviluppando nuovi concetti di notebook modulari, ideati per essere facilmente disassemblati, aggiornati, riparati o ricondizionati. È il caso del Concept Luna, un prototipo di notebook realizzato con moduli a incastro che, diversamente dai prodotti tradizionali, permettono di smontare le componenti più importanti senza svitare una vite o scollare le superfici (Fig. 12).

Il prodotto è caratterizzato da uno chassis in alluminio dotato di una chiave speciale che permette di rimuovere una striscia sopra la tastiera, e quindi disassemblare tutti i componenti. Ogni componente rappresenta un modulo funzionale del notebook aggregato ad altri con sistemi a in-

castro e interconnesso secondo un preciso layout che definisce la gerarchia generale dell'assieme del PC (Fig. 13): il modulo strutturale 'a', lo chassis, ha la funzione di accogliere tanto i moduli che forniscono le prestazioni di calcolo e autonomia energetica (il modulo scheda madre 'b', la batteria 'c', ecc.) quanto i moduli per l'interfaccia e l'interazione con il notebook (modulo tastiera 'd' e il modulo display 'e').

A supporto di questo nuovo concept Dell ha ideato una 'micro-factory' che impiegherà robot specializzati nel disassemblaggio dei moduli e la telemetria per diagnosticare lo stato di salute dei singoli componenti (Fig. 14). Questo nuovo modello industriale per la circolarità rappresenta la vera opportunità per innescare, come sostiene Dell Technologies, un cambiamento epocale nel settore della produzione di notebook, generando un nuovo sistema di prodotto-servizio in grado di comprendere meglio quali componenti possono essere riutilizzati, ricondizionati o riciclati, ed infine, rifabbricati. Il Concept Luna esprime una filosofia di DfM principalmente orientata a rendere il prodotto facilmente disassemblabile per il ricondizionamento e la rifabbricazione delle parti: tale approccio è stato ulteriormente ottimizzato attraverso l'implementazione della robotica e della telemetria e sollevando l'utente dalla responsabilità di dismettere il prodotto a fine vita.

Questo tipo di tecnologia permette di sistematizzare e processare grandi quantità di dati, favorendo le condizioni necessarie affinché si mettano in pratica i cicli di interconnessione previsti dall'Economia Circolare (Barbero and Ferrulli, 2023). Il concept Dell è in fase prototipale, ma sarà interessante capire quale sarà l'evolversi del prodotto; magari si immetteranno sul mercato altre versioni che implementino i moduli sviluppati per la generazione di prodotti con il monitor più grande, oppure con un nuovo packaging specifico per la logistica e il servizio di riparazione e aggiornabilità previsto nella 'micro-factory'.

Conclusioni | La modularità ha avuto da sempre un ruolo importante nel processo di industrializzazione dei prodotti complessi per ottenere la massima standardizzazione ed elevati vantaggi di efficienza produttiva. Scomponendo un prodotto in componenti modulari le aziende sono riuscite a ottimizzare i tempi e i costi di produzione e di assemblaggio dei prodotti, incrementandone anche l'affidabilità, in quanto i moduli difettosi potevano essere facilmente identificati e sostituiti, nell'ottica di tendere a 'zero difetti'.

Più di recente, con l'affermarsi delle problematiche ambientali e dei temi della sostenibilità dei prodotti, il concetto di modularità ha assunto un nuovo valore nella progettazione industriale, diventando un pre-requisito determinante per migliorare specialmente il fine vita dei materiali. Nella cultura del design per sostenibilità, fin dagli anni '90, si sono affermati criteri e metodi di progettazione finalizzati al 'disfare' ovvero a rendere i prodotti disassemblabili per facilitare la separazione dei componenti da conferire alle piattaforme di riciclo.

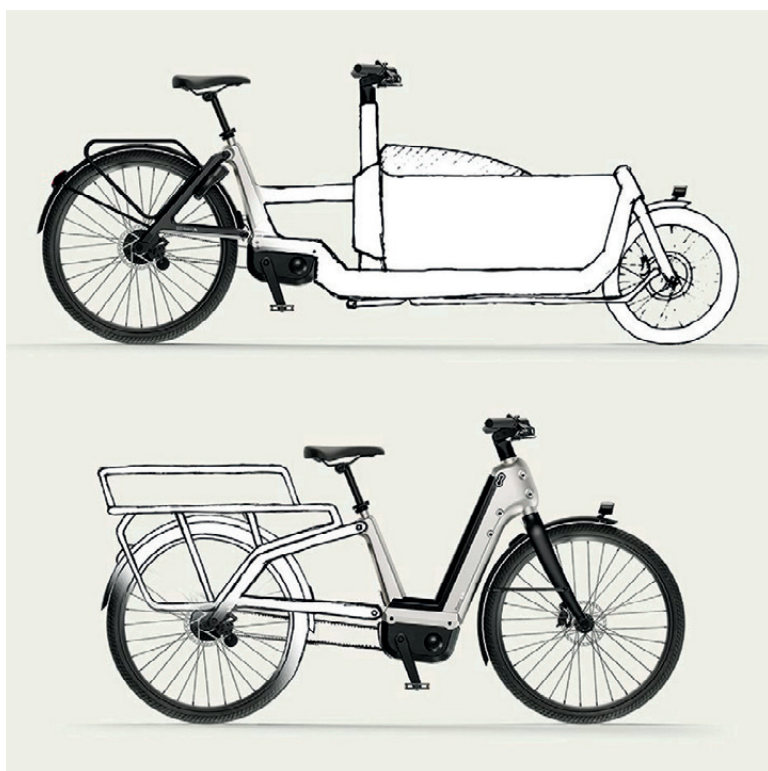
L'attuale fase di transizione verso l'Economia Circolare ha ulteriormente trasformato il concetto di modularità, che oggi svolge un ruolo cruciale per l'estensione della durata della vita utile dei prodotti e per consentire la rifabbricazione e il riutilizzo, oltre che il riciclaggio. Stiamo assistendo infatti a una trasformazione del concetto di modularità dei prodotti che diventa funzionale non solo a incrementare la loro sostenibilità ambientale ma soprattutto la loro circolarità. Il design modulare è diventato una strategia progettuale che supporta una cultura del 'fare per rifare', oltre che del 'fare per disfare' la quale ne rimane la base metodologica di partenza.

Il design modulare è oggi finalizzato in primo luogo a 'ridurre' e 'riusare' e poi a 'riciclare'. I casi studio descritti evidenziano questa transizione della cultura del design dal 'disassembling' al 're-making', ovvero sottolineano come la modularità, nello sviluppo di nuovi prodotti, possa essere una



Fig. 5 | View of the Roetz Life frame (module 'a'), designed to accommodate all product modules (credit: Roetz-Bikes).

Fig. 6 | Concept of the cargo module to transform the urban version of the Roetz-bike to the delivery version (credit: Roetz-Bikes).





Figg. 7, 8 | Costume Armchair and main modules of the Armchair version: the armchair core 'a'; the seat, composed of a spring insert 'b' and a polyurethane layer 'c'; the fabric cover 'd' (credit: Magis).

strategia declinabile in modi diversi per le differenti tipologie merceologiche di prodotto (mezzi di trasporto, arredi, elettronica di consumo, etc.) al fine di allungare la loro vita utile, rendendo gran parte delle loro componenti riutilizzabili e rifabbricabili, trasformando i modelli di business delle aziende che, da fornitrici di prodotti, diventano erogatrici di nuovi servizi di manutenzione, riparazione, aggiornamento e rifabbricazione.

Il percorso verso una nuova concezione del fine vita dei prodotti attraverso le strategie del DfM appare per alcuni settori ancora lungo e in attesa di ulteriori sviluppi: la mancanza di servizi di riparazione e rifabbricazione, implementati quasi esclusivamente nel settore elettronico, rappresenta la principale barriera per un cambiamento radicale verso un modello di business più circolare. Tuttavia negli ultimi anni molte aziende del manifatturiero, stimolate anche dalla ricezione di nuove normative come la Direttiva Ecodesign 2009/125/CE (European Commission, 2023), stanno iniziando a mettere in campo delle pratiche progettuali volte al miglioramento delle performance ambientali di prodotto e, in questo senso, il design modulare diventa la più importante strategia progettuale per raggiungere questi obiettivi e realizzare prodotti e prodotti-servizi realmente circolari.

The article aims to re-discuss the concepts of 'modularity' and 'modular design' in light of the recent debate on the transition to the Circular Economy that, in recognising a strategic role for design in the transformation of the current economic model from linear to circular, highlights the importance of modular design as a design strategy to extend the useful life of products, making them reusable, maintainable, repairable, upgradable and remanufacturable (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Charter, 2018).

The first part of the contribution deals with the Design for Modularity (DfM) concept in the entrepreneurial and design culture of 'making to unmake', that is, disassembling products designed especially to recover and recycle end-of-life materials. The second part focuses on describing three

recently developed case studies of modular products to detect DfM strategies developed in favour of a 'making to remake' logic, i.e., to design sustainable products according to Circular Economy criteria. Through literature review and case-study description, the article intends to outline the current reflection, developed within the culture of design for sustainability, on the concept of modularity as a strategy to increase the circularity and durability of products, in particular with reference to the radical changes in the production and consumption system necessary to achieve the transition to the Circular Economy (Lacy and Rutqvist, 2015; van der Berg and Bakker, 2015).

Since the 1990s, scholars concerned with Eco-design or Design for Environmental Sustainability have defined and explored Design for Disassembling (DfD) strategies to make it easier to recycle a product's components and materials as a priority (Keoleian and Menerey, 1994; Manzini and Vezzoli, 1998; Bryant et alii, 2004; Machado and Morioka, 2021). Product architecture, especially that of products with high complexity, was being revised and simplified by working on product modularity as a standardisation strategy to generate production platforms that, from a limited number of components, could develop different configurations of finished products (Ulrich, 1994; Miller and Elgård, 1998; Bordignon, 2009; Yan and Feng, 2013, Crippa et alii, 2023). In addition, DfM's solutions made it possible to rationalise production costs and time, increase production flexibility and product customisation, reduce resource consumption, and significantly improve the possibilities for the disassembly of components and recycling of end-of-life materials (Jacobs, Vickery and Droge, 2007; Umeda et alii, 2008). In recent years, modular product design has been a strategy capable of combining environmental and economic benefits, growing an entrepreneurial and design culture of 'making to unmake' and enabling the development of important know-how on recycling processes, recycled materials and their performance, also through the implementation of pilot projects of disassembly platforms (home appliances, automobiles, etc.).

Today, in the transition toward the Circular Economy, modular design acquires new importance as

a design strategy to drastically reduce waste production, conceptualising products with a 'making to remake' perspective that can be disassembled, primarily to extend their useful life and, only as a last resort, to recycle their materials by valorising them into high-quality secondary materials (van der Berg and Bakker, 2015; Sonego, Echeveste and Debarba, 2018). Therefore, given the new economic model, product modularity must be designed to be functional to the 3Rs strategy, Reduce / Reuse / Recycle, i.e., minimise waste generation, reuse as many components as possible by making products repairable, maintainable, upgradable and remanufacturable, and, finally, recyclable.

In this new scenario, where priority design strategies are related to product durability, modularity becomes a fundamental requirement to transform the 'use phase' into reuse, maintenance, repair and the 'production phase' into upgrade / renewal and remanufacturing (Soh, Ong and Nee, 2014; Machado and Morioka, 2021). DfM approaches are discussed below, highlighting their benefits and possible developments in the transformation of the current economic model from linear to circular, as a significant design strategy for extending the life of products, increasing their intensity of use, and developing new circular business models that consolidate a business culture of 'making to remake' and not just 'making to unmake'.

Modularity to 'unmake' | Since the beginning of industrialisation, modularity-oriented design, generated through a process of standardisation and rationalisation of modules, has been an effective strategy for increasing production efficiency and company competitiveness. Indeed, modularity is a key design principle, both in response to 'mass customisation', in which a wide range of products is achieved by combining standardised, platform-managed modules (Miller and Elgård, 1998; Baldwin and Clark, 1999; Bask et alii, 2010) and, particularly today, to facilitate disassembly of components and end-of-life recycling of materials (Bordignon, 2009; Ijomah et alii, 2010; Mital et alii, 2014).

In the late 1990s, Salhieh and Kamrani (1999) described a design model for modularity which



Fig. 9-11 | Costume Armchair, Armchair version: Detail of the lacing system between the fabric and the armchair core to proceed with upholstery wash or replacement; Detail of the plastic connector used to join the other modules and the armrest; Layout flexibility and customisation generated through module modularity (credit: Magis).

considers both the decomposition of product functions and the creation of platforms, i.e., varieties of the same product built around a basic central unit to which different modules can be added. This approach, also referred to as ‘commonality’, views a module as an essential functional unit possessing its own autonomy from the product of which it is a part: its replacement with another module creates a new product variant and promotes the creation of families developed around a specific platform (Sanderson and Uzumeri, 1997; Abdullah, Kamaruddin and Ripin, 2008). Modularity, therefore, is instrumental in optimising products and components, promotes continuous refinement and adaptability to the changing needs expressed by the market and users, and is strongly related to the end-of-life scenario. The intersection of modularity and sustainability has been the subject of several studies, such as one carried out in the United States in 2004 by a group of engineers who focused on designing methods aimed at integrating environmental sustainability into product development by developing the concept of modularity throughout their entire life cycle (Bryant et alii, 2004). The goal was to optimise sustainability through a modular approach that considered ease of recycling, easy disassembly, and reduced resources from the development stage.

Another study conducted by Newcomb, Bras and Rosen (1998) focused on the link between

modular design and product life cycle, with the aim of developing architectures able to reduce environmental impacts. Their research was based on the assumption that a product’s architecture plays a crucial role in determining aspects such as assembly, disassembly, recycling, and service at the end of the product’s useful life. A high modularity index can lead, therefore, both to a significant contribution in terms of recycling and recovery of materials and to a substantial reduction in costs related to assembly, disassembly and maintenance. Therefore, since the 1990s, modularity has been a fundamental product requirement for sustainable design culture to enable disassembly and recycling of components, i.e., a pivotal concept to increment the culture of ‘making to unmake’.

Modularity to ‘remake’ | As previously stated, modularity is not a new concept in industrial design, but it is taking on a new dimension today. In addition to traditional interface and composability, the emphasis is on the ability to upgrade, repair, and replace parts that no longer work, as well as on implementing more advanced features into specific components to increase product life, especially in electronic products. In this context, components or modules become key elements of a ‘remake’ oriented concept of modularity. This new vision emerged in the transition from a design paradigm for disassembling to a design paradigm for remanufactur-

ing (van der Berg and Bakker, 2015). The theoretical basis for this new approach to design was developed through a review and update of technical and scientific literature, which identified new criteria and key parameters. These criteria outline the creation of modular products that are efficient from a production standpoint and in the use and disposal phases, as modularity is instrumental in extending their useful life. Each module is designed with a planned lifespan so that products can be easily disassembled to reuse their most durable components, upgrade their functionality, and remanufacture parts with a shorter lifespan.

The principle behind this approach to modular design is that reuse / remanufacturing is more sustainable than recycling. Therefore, a design culture of ‘making to remake’ is beginning to take root, which particularly alters the product use phase and incentivises business models based on maintenance, repair and remanufacturing services. Two main aspects of modularity are highlighted in this new scenario: one user-oriented and the other business-oriented. Modularity for user-made repairs allows consumers to perform simple maintenance and repair work on their products; on the other hand, there is modularity in favour of the company, which will enable them to retire products, upgrade them, and remarket them as refurbished and remanufactured products, thus helping prolong their life cycle.

The context of use and the product’s useful life determine the DfM strategy to be pursued. In fact, when designing maintainable and reconditionable or remanufacturable products, priority is given to non-destructive disassembly, while destructive disassembly proves to be more appropriate from a recycling perspective: the type and quality of the disassembly process or, instead, of the connections and fastening elements, becomes decisive for end-of-life and therefore warrants special attention (Peeters et alii, 2012; Mital et alii, 2014).

Authors van der Berg and Bakker (2015) emphasise the importance of the concept of ‘remake’ in the context of product circularity, a term that encompasses a series of actions undertaken when a product returns from the customer to the company, thus helping to make it circular effectively. To generate the conditions for developing modular products for the remake, modules must be designed to enable effective repairs and upgrades, which implies the adoption of standardised interfaces and the implementation of reversible connections.

In addition to the module design criteria, it is necessary to rethink new support services within the industrial process and supply chain for the maintenance and durability of product performance, adopting control systems such as prognostics and diagnostics (i.e., evaluation of the residual reliability of components) and developing ‘reverse’ logistics, i.e., retrieval of products or modules, on behalf of the companies, to proceed with their repair or remanufacturing. Therefore, in recent years, in the transition to the Circular Economy, design practices related to DfM focus on the goal of ‘making to remake’ to increase the circularity and durability of products, as well as their recyclability.

The following paragraphs analyse and discuss three case studies of contemporary products belonging to different commodity sectors, designed and manufactured with special attention

to the criteria of modularity and disassemblability to make the products easily disassemblable, repairable, upgradable, customisable, and remanufacturable, in line with the goals of circularity.

Products were selected based on year and country of manufacture, identifying recent products that were no more than five years old and made in different countries, on whether they were platform-designed, and on the use of DfM strategies aimed at repairing and upgrading, increasing technical and aesthetic durability, reusing and remanufacturing. The case studies identify different approaches to circularity that go well beyond material recyclability through the use of modular design to extend the useful life of products and/or their components (Figg. 1, 2).

The Roetz Life bicycle: modularity to increase repair and upgrading

In northern Europe, sustainable urban mobility, through the widespread use of bicycles and related services, has been part of local culture and everyday life for many years, although each year more than one million bicycles become waste, sometimes without ever having been used (Bakker et alii, 2017). In response to this, Dutch company Roetz-Bikes developed Roetz Life, a customisable electric bicycle concept that is 'circular' to last over time and drastically reduce the risk of generating waste and scrap (Fig. 3). The architecture of Roetz Life (Fig. 4) is divided into five modules assembled according to a precise hierarchy: the frame module (a); the battery module (b); the wheel module (c); the transmission module (d); the brakes module (e).

The DfM approach taken in the development of Roetz Life is geared primarily to generating a product configured to be easily maintainable and upgradeable over time, through the company's sales channel and a maintenance support service to incentivise repair and reuse of components. At the heart of the project is the highly innovative design of the frame (Fig. 5), conceived as a modular skeleton in which all components are reversibly interconnected so that they can be disassembled and replaced regardless of the state of wear and

tear or damage to the other components. The main design criteria that led to the definition of the product architecture were: the creation of a monolithic frame that integrates certain components (for example, the tubes for the handlebar and saddle), accommodates modules and accessories, and lends itself to customization and coverization; the choice to leave joints and small parts visible, making it more intuitive for the user to understand where and how to disassemble the parts; the exclusion of welded components and their replacement with interlocking coupling systems and standard small parts (especially for the battery and transmission module); the implementation of reversible connection systems that provide the possibility for the user to repair or replace components to change and extend the performance of the product, for example, to switch from the 'urban' to the 'delivery' version (Fig. 6); the implementation of a series of sensors that make the product 'intelligent', enabling continuous monitoring of the wear status of the most stressed parts.

Although the DfM concept in the case of the Roetz product represents a virtuous case of circularity, it is necessary to point out the critical nature of the maintenance service offered: in addition to being unclear regarding its use, the service is still tied to the company's geographic area of residence, an aspect that limits the possibility of extending e-bike repair, and consequently also its marketing, to other countries.

The Costume armchair: modularity to increase technical and aesthetic durability

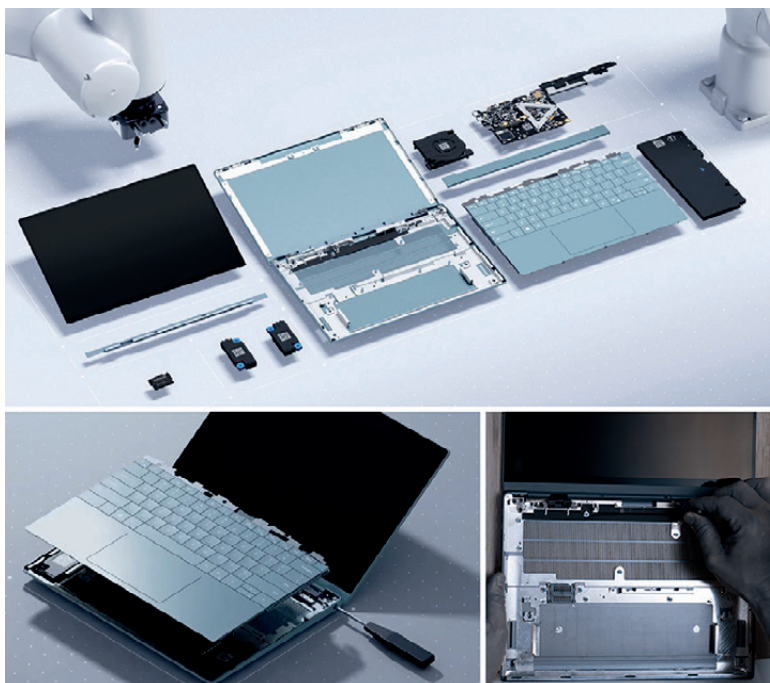
If in the past the concept of durability was a basic assumption for many products, today, in the wake of years of affirmation of planned obsolescence, going back to creating 'timeless' products is almost a revolution, especially in the apparel and furniture sectors, where accelerated technical obsolescence is compounded by aesthetic obsolescence of products driven by fashion and trends. However, efforts are being made to reverse this 'disposable' trend that has taken hold in the furniture industry. The Costume Armchair, a collaboration between

Magis and designer Stefan Diez, is a fascinating case study of furniture that uses modular design to slow down technical and aesthetic obsolescence and increase product durability. According to Diez, furniture can be compared to the alphabet system, where the correct articulation of letters or forms produces different sentences, stories and projects. The design language of the Costume modular system perfectly reflects this design philosophy, reinterpreting the traditional way of constructing armchairs in a process of useful modularity for circularity.

The Costume armchair, and especially the Armchair version (Figg. 7, 8), has been designed according to a simplified modular architecture of four units ('a'+ 'b'+ 'c'+ 'd'), capable of generating a modular, maintainable and upgradeable system that offers the end user the opportunity to reconfigure and customise the product with easy disassembly and assembly.

Module 'a', the chair's core, is a unit made of recycled polyethylene using rotational moulding technology, designed to simplify assembly steps and accommodate the other modules through joints and juxtapositions. The seat is generated by the coupling of a spring insert (the 'b' module) and a layer of polyurethane (the 'c' module): this solution not only uses far less foam than conventional sofas, but is also easily disassembled to allow end-of-life recycling. The soft part of the armchair is completed by module 'd', a fabric cover that can be removed, if necessary, using four elastic loops fastened to the core (Fig. 9). Another great innovation of Costume is the creation and use of two other units, the 'armrest' and the 'plastic joint' (Fig. 10), which together with the other modules make it possible to generate a platform system with various possibilities for the configuration of the versions included in the collection (Fig. 11).

In most cases, sofas are pieces of furniture composed of many materials joined together irreversibly, making it almost impossible to repair worn parts and recycle the various components. In contrast, the DfM approach adopted in the development of Costume aims to increase durability



Figg. 12, 13 | Concept Luna prototype: 13" notebook designed with a series of modules that can be easily disassembled and connected via interlocking and reversible connections; the main modules ('a'+ 'b'+ 'c'+ 'd'+ 'e') that configure the notebook (credits: Dell Inc.).

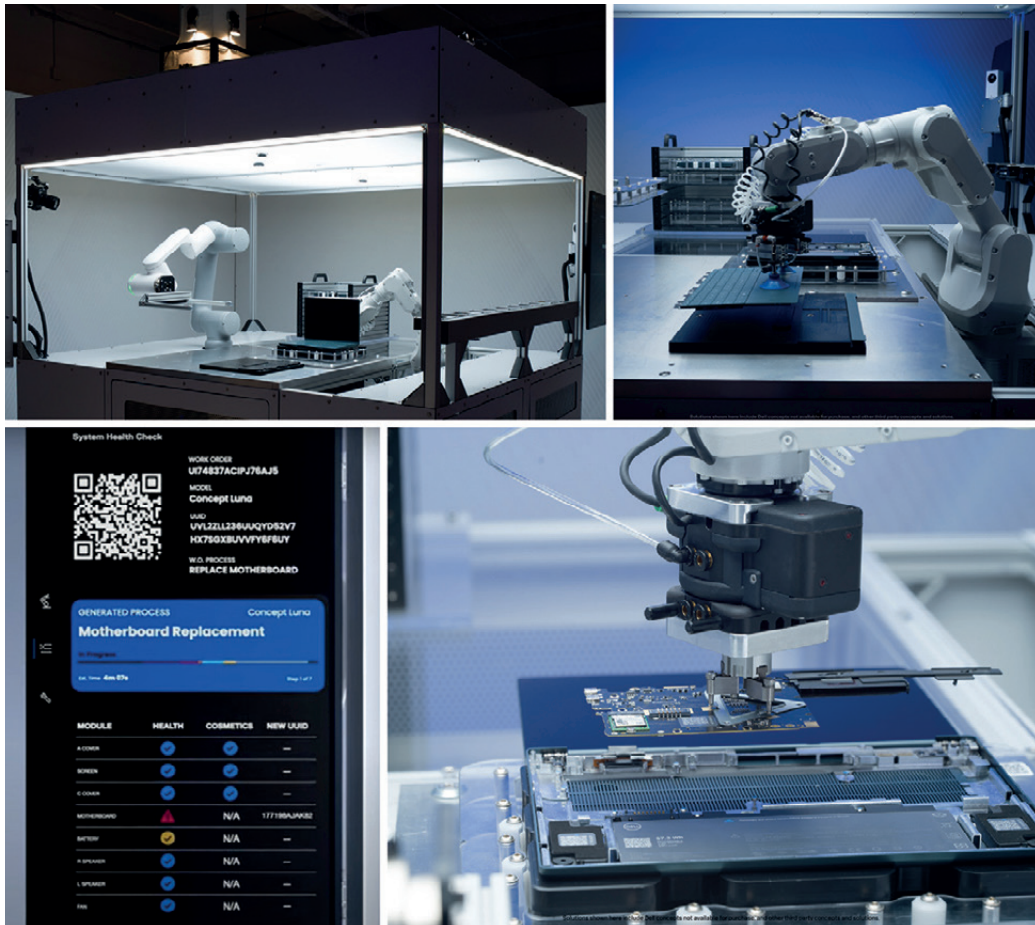


Fig. 14 | Some stages of the Luna notebook assembly process using robots and telemetry to diagnose the health of individual components within the 'micro-factory' (credit: Dell Inc.).

and reduce aesthetic and technical obsolescence through two design criteria: the extreme simplification of the product architecture and the development of a 'user-friendly' disassembly system.

However, despite the product's high disassembly index, which allows for both good maintainability and aesthetic upgradability, an ad hoc service for the recovery and reuse of the modules has not been developed: the end-of-life scenario of Costume, i.e., the recycling of the components, is still the responsibility of the end user, while the activation of a service such as this would produce value on the entire supply chain, including on the social fabric, by incentivising change toward a circular and more sustainable model (Fagnoni and Olivastri, 2019).

The Concept Luna notebook: modularity to increase remanufacturing

Most consumer electronic products are manufactured according to a principle of programmed obsolescence of components and with a precise duration of their useful life. In addition, the end consumer almost always bears the responsibility for the end-of-life of these products that are difficult to disassemble for proper recycling, despite a European Directive defining Extended Producer Responsibility (European Parliament and the Council of the European Union, 2018). In fact, in recent years, some of the major electronics companies are rethinking their products to extend their useful life, primarily through repair and reconditioning services. Among these, Dell is developing new modular notebook concepts designed to be easily disassembled, up-

graded, repaired or reconditioned. This is the case with Concept Luna, a prototype notebook made with interlocking modules that, unlike traditional products, allow significant components to be disassembled without loosening screws or peeling off surfaces (Fig. 12).

The product features an aluminium chassis equipped with a special key that allows removing a strip above the keyboard and disassembling all components. Each component represents a functional module of the notebook aggregated to others with interlocking systems and interconnected according to a precise layout that defines the overall hierarchy of the PC assembly (Fig. 13): structural module 'a', which is the chassis, is responsible for accommodating both the modules that provide the computing performance and power autonomy (the motherboard module 'b', the battery 'c', etc.) and the modules for interface and interaction with the notebook (keyboard module 'd' and the display module 'e').

To support this new concept, Dell has envisioned a 'micro-factory' that will employ specialised robots to disassemble modules and telemetry to diagnose the health of individual components (Fig. 14). This new industrial model for circularity represents the true opportunity to trigger, as Dell Technologies argues, a meaningful change in the notebook manufacturing industry by generating a new product-service system that better understands which components can be reused, reconditioned or recycled, and ultimately, remanufactured. Concept Luna expresses a DfM philosophy primarily geared toward ensuring that the product can be

easily disassembled for reconditioning and re-manufacturing of parts: this approach has been further optimised through the implementation of robotics and telemetry and by relieving the user of the responsibility of disposing of the product at the end of its life.

This technology makes it possible to systematise and process large amounts of data, fostering the conditions necessary to implement the interconnection cycles envisioned by the Circular Economy (Barbero and Ferrulli, 2023). The Dell concept is in the prototype stage, but it will be interesting to see the development of the product; perhaps other versions will be brought to market implementing the modules developed for the generation of products with the larger monitor or with new packaging specifically for logistics and the repair and upgradability service provided in the 'micro-factory'.

Conclusions | Modularity has always played an important role in the industrialisation process of complex products to achieve maximum standardisation and high production efficiency advantages. Modularity has always played an important role in the industrialisation process of complex products to achieve full standardisation and high production efficiency advantages. By breaking a product down into modular components, companies could optimise the time and cost of manufacturing and assembling products while also increasing their reliability, as defective modules could be easily identified and replaced, striving towards 'zero defects'. More recently, with the rise of environmental issues and product sustainability issues, the concept of modularity has taken on a new value in industrial design, becoming a crucial pre-requisite, especially to improve the end-of-life of materials. The design for sustainability culture, since the 1990s, has seen the emergence of design criteria and methods aimed at 'unmaking', i.e., making products disassemblable to facilitate the separation of components for delivery to recycling platforms.

The current transition towards the Circular Economy has further transformed the concept of modularity, which now plays a crucial role in extending the useful life of products and enabling their remanufacturing and reuse, as well as their recycling. In fact, we are witnessing a transformation of the concept of modularity of products, which becomes functional to increase their environmental sustainability and especially their circularity. Modular design has become a design strategy that supports a culture of 'making to remake' as well as 'making to unmake', which remains its methodological basis.

Modular design today primarily aims at 'reducing' and 'reusing' and subsequently 'recycling'. The described case studies highlight this transition of design culture from 'disassembling' to 'remaking', i.e., they emphasise how modularity, in the development of new products, can be a strategy declinable in different ways for different product types (transportation, furniture, consumer electronics, etc.) to extend their useful life, making most of their components reusable and remanufacturable, thus also transforming the business models of companies that, from product suppliers, become providers of new maintenance, repair, upgrade and remanufacturing services. The path toward a new understanding of product end-

of-life through DfM strategies appears, for some sectors, still long and in need of further development: the lack of repair and remanufacturing services, implemented almost exclusively in the electronics sector, is the main barrier to a radical change toward a more circular business model.

However, in recent years, many manufacturing companies, also stimulated by the receipt of new regulations such as the Ecodesign Directive 2009/125/EC (European Commission, 2023), are beginning to implement design practices aimed at improving product environmental performance

and, in this sense, modular design becomes the most important design strategy to achieve these goals and create truly circular products and product-services.

References

- Abdullah, A. G., Kamaruddin, A. R. and Ripin, Z. M. (2008), "Utilization of Design for Modularity Approach to Identify Product Platform", in *Modern Applied Science*, vol. 2, issue 2, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.5539/mas.v2n2p19 [Accessed 17 October 2023].
- Baldwin, C. Y. and Clark, K. B. (1999), *Design Rules – The power of modularity – Volume 1*, MIT Press, Cambridge. [Online] Available at: dl.acm.org/citation.cfm?id=555152 [Accessed 17 October 2023].
- Bakker, C., van Dam, S., de Pauw, I., van der Grinten, B. and Asif, F. (2017), *ResCoM Design Methodology for Multiple Lifecycle Products*, Delft University of Technology. [Online] Available at: pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/54414681/D3_4_Design_Methodology_for_Multiple_Lifecycle_Products_final.pdf [Accessed 17 October 2023].
- Barbero, S. and Ferrulli E. (2023), "Transizione ecologica e digitale – Il Design Sistemico nei processi di innovazione aperta delle PMI | Ecological and digital transition – Systemic Design in SMEs open innovation processes", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 269-280. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13232023 [Accessed 17 October 2023].
- Bask, A., Lipponen, M., Rajahonka, M. and Tinnilä, M. (2010), "The concept of modularity – Diffusion from manufacturing to service production", in *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 21, issue 3, pp. 355-375. [Online] Available at: doi.org/10.1108/17410381011024331 [Accessed 17 October 2023].
- Bordignon, M. (2009), *La modularità e il suo potenziale ruolo nelle imprese – La gestione dell'approccio modulare e le criticità, le opportunità e i rischi legati alla modularizzazione*, Aracne Editrice, Roma.
- Bryant, C. R., Sivaramakrishnan, K. L., Van Wie, M., Stone, R. B. and McAdams, D. A. (2004), "A Modular Design Approach to Support Sustainable Design", in *Proceeding of the ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Salt Lake City, September 28-October 2*, vol. 3d, ASME, pp. 909-918. [Online] Available at: doi.org/10.1115/detc2004-57775 [Accessed 17 October 2023].
- Charter, M. (2018), *Designing for the Circular Economy*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315113067 [Accessed 17 October 2023].
- Crippa, D., Cason Villa, M., Di Prete, B., Ratti, L., Rebaglio, A., Zanini, M. and Zanutto, F. (2022), "Verso un progetto circolare, tra architettura e allestimento – Piattaforme digitali per il riuso | Towards a circular project, between architecture and exhibition design – Digital platforms for reuse practices", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 234-245. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1221202212202022 [Accessed 16 October 2023].
- Ellen MacArthur Foundation (2013), *Towards the circular economy Vol. 1 – An economic and business rationale for an accelerated transition*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an [Accessed 17 October 2023].
- European Commission (2023), *Commission Regulation (EU) 2023/826 of 17 April 2023 laying down eco-design requirements for off mode, standby mode, and networked standby energy consumption of electrical and electronic household and office equipment pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Regulations (EC) No 1275/2008 and (EC) No 107/2009*, document 32023R0826. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/826/oj [Accessed 17 October 2023].
- European Parliament and the Council of the European Union (2018), *Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste*, document 32018L0851, PE/11/2018/REV/2. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj [Accessed 17 October 2023].
- Fagnoni, R. and Olivastri, C. (2019), "Hardsign vs Softsign", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 145-152. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5162019 [Accessed 12 October 2023].
- Ijomah, W. L., McMahon, C. A., Hammond, G. P. and Newman, S. T. (2010), "Development of robust design-for-remanufacturing guidelines to further the aims of sustainable development", in *International Journal of Production Research*, vol. 45, issue 18-19, pp. 4513-4536. [Online] Available at: doi.org/10.1080/00207540701450138 [Accessed 17 October 2023].
- Jacobs, M. D., Vickery, S. K. and Droge, C. (2007), "The effects of product modularity on competitive performance", in *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 27, issue 10, pp. 1046-1068. [Online] Available at: doi.org/10.1108/01443570710820620 [Accessed 17 October 2023].
- Keoleian, G. A. and Menerey, D. (1994), "Sustainable Development by Design – Review of Life Cycle Design and Related Approaches", in *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 44, issue 5, pp. 645-668. [Online] Available at: doi.org/10.1080/1073161x.1994.10467269 [Accessed 17 October 2023].
- Lacy, P. S. and Rutqvist, J. (2015), "The Roots of the Circular Economy", in *Waste to Wealth – The Circular Economy Advantage*, Palgrave Macmillan, London, pp. 19-23. [Online] Available at: doi.org/10.1057/9781137530707_2 [Accessed 17 October 2023].
- Machado, N. T. and Morioka, S. N. (2021), "Contributions of modularity to the circular economy – A systematic review of literature", in *Journal of Building Engineering*, vol. 44, article 103322, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103322 [Accessed 17 October 2023].
- Manzini, E. and Vezzoli, C. (1998), *Lo sviluppo di prodotti sostenibili – I requisiti ambientali dei prodotti industriali*, Maggioli Editore, Rimini.
- Miller, T. D. and Elgård, P. P. E. (1998), "Defining Modules, Modularity and Modularization – Evolution of the Concept in a Historical Perspective", in *Design for integration in manufacturing | Proceedings of the 13th IPS Research Seminar, Fuglsø, Denmark on 20-21, April 1998, Fuglsø, IKS*. [Online] Available at: alvarestech.com/temp/PDP2011/CDAndrea/MODULARIDADE/MILLER%202005.pdf [Accessed 17 October 2023].
- Mital, A., Desai, A., Subramanian, A. and Mital, A. (2014), "Designing for assembly and disassembly", in Mital, A., Desai, A., Subramanian, A. and Mital, A. (eds), *Product Development | A Structured Approach to Consumer Product Development, Design, and Manufacture*, Elsevier, Amsterdam, pp. 159-202. [Online] Available at: doi.org/10.1016/b978-0-12-799945-6.00007-7 [Accessed 17 October 2023].
- Newcomb, P. J., Bras, B. and Rosen, D. W. (1998), "Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle", in *Journal of Mechanical Design*, vol. 120, issue 3, pp. 483-490. [Online] Available at: doi.org/10.1115/1.2829177 [Accessed 17 October 2023].
- Peeters, J., Vanegas, P., Dewulf, W. and Duflou, J. (2012), "Design for demanufacturing – A life cycle approach", in *Proceedings of Conference I-SUP2012 – Innovation for Sustainable Production, Bruges, Belgium, May 7-9, 2012*, pp. 6-9. [Online] Available at: scholar.google.it/scholar?q=Design+for+demanufacturing:+a+life+cycle+approach&hl=it&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar [Accessed 17 October 2023].
- Salhieh, S. M. and Kamrani, A. K. (1999), "Macro level product development using design for modularity", in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 15, issue 4, pp. 319-329. [Online] Available at: doi.org/10.1016/s0736-5845(99)00008-3 [Accessed 17 October 2023].
- Sanderson, S. W. and Uzumeri, M. (1997), *Managing product families*, McGraw-Hill/Irwin, New York.
- Soh, S., Ong, S. and Nee, A. Y. C. (2014), "Design for Disassembly for Remanufacturing – Methodology and Technology", in T. K. Lien (ed.), *Procedia 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, vol. 15, pp. 407-412. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.053 [Accessed 17 October 2023].
- Sonego, M., Echeveste, M. E. S. and Debarba, H. G. (2018), "The role of modularity in sustainable design – A systematic review", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 196-209. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.106 [Accessed 17 October 2023].
- Ulrich, K. (1994), "Fundamentals of Product Modularity", in Dasu, S. and Eastman, C. (eds), *Management of Design*, Springer, Dordrecht, pp. 219-231. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-94-011-1390-8_12 [Accessed 17 October 2023].
- Umeda, Y., Fukushige, S., Tonoike, K. and Kondoh, S. (2008), "Product modularity for life cycle design", in *CIRP Annals*, vol. 57, issue 1, pp. 13-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.115 [Accessed 17 October 2023].
- van der Berg, M. R. and Bakker, C. A. (2015), "A product design framework for a circular economy", in Cooper, T., Braithwaite, N., Moreno, M. and Salvia, G. (eds), *Product Lifetimes and the Environment – Conference Proceedings, 17-19 June 2015, Nottingham (UK)*, Nottingham Trent University, CADBE, Research in Design Series, vol. 9, IOS Press, pp. 365-379. [Online] Available at: plateconference.org/pdf/plate_2015_proceedings.pdf [Accessed 17 October 2023].
- Yan, J. and Feng, C. (2013), "Sustainable design-oriented product modularity combined with 6R concept – A case study of rotor laboratory bench", in *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 16, issue 1, pp. 95-109. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10098-013-0597-3 [Accessed 17 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	10 September 2023
Revised	16 October 2023
Accepted	22 October 2023
Published	31 December 2023

RELAZIONI MODULARI NEGLI SPAZI DI LAVORO

Approcci data-driven per progettare il futuro

MODULAR RELATIONS IN WORK ENVIRONMENTS

Data-driven approaches to design their future

Paolo Tamborrini, Sofia Cretaio

ABSTRACT

Il contributo esplora la natura evolutiva degli spazi di lavoro in un contesto di flessibilità tecnologica e sociale. La dimensione modulare dell'ufficio viene analizzata attraverso il cambiamento delle soluzioni spaziali sulla base di cambiamenti socioculturali che hanno influenzato modelli gestionali e scelte progettuali. In seguito, l'analisi si concentra sull'efficacia di approcci data-driven per esplorare i contesti lavorativi: i dati sono uno strumento utile a comprendere le esperienze e le percezioni dei dipendenti per elaborare soluzioni volte a migliorare il benessere all'interno degli spazi di lavoro. Obiettivo è delineare la trasformazione dell'ufficio da modulo chiuso e individualista a sistema aperto e condiviso in cui i dati svolgono un ruolo fondamentale nella definizione del futuro degli spazi di lavoro.

This contribution explores the evolutionary nature of workspaces in the context of technological and social flexibility. The modular dimension of an office is analysed through a change in spatial solutions considering the influence that socio-cultural transformations have had on management models and design choices. The analysis focuses on the effectiveness of data-driven approaches when used to explore work contexts: data are a useful tool to understand the experiences and perceptions of employees when developing solutions to improve well-being in the workplace. This contribution aims to outline the transformation of an office from a closed and individualistic module to an open and shared system in which data play a fundamental role in defining the future of workspaces.

KEYWORDS

luogo di lavoro, futuro del lavoro, progettazione guidata dai dati, modelli comportamentali, interazione uomo-spazio

workplace, future of work, data-driven design, behavioural patterns, human-space interaction

Paolo Tamborrini, Full Professor of Design at the University of Parma (Italy), in 2015 co-founded the Innovation Design Lab. He has coordinated numerous research activities in design and communication for sustainability. He is the President of the Inter-University Course in Sustainable Design for the Food System and Director of 'Graphicus – Designing communication', a magazine that tells the world about communication and involves authors of distant but connected disciplines. E-mail: paolo.tamborrini@unipr.it

Sofia Cretaio, PhD Candidate in Management, Production, and Design at the Politecnico di Torino (Italy), is a member of the Innovation Design Lab and the editorial staff of the 'Graphicus – Designing communication' scientific journal. Her research focuses on using data to innovate work environments' spatial and organisational dynamics, to promote safety and sustainability. E-mail: sofia.cretaio@polito.it



Oggi il luogo di lavoro trascende un ambiente fisico con confini ben definiti: l'era pandemica ha sconvolto le dinamiche e i ritmi dei lavoratori, ridefinendo l'ufficio in quanto spazio, mentre l'ambiente digitale è integrato in quello fisico, tramite strumenti e piattaforme che trasformano i processi di comunicazione e lo scambio di conoscenze. Il contributo intende esplorare l'ufficio – l'unità con cui misurare performance, produttività, interazione e scambio di informazioni – come un modulo fatto di componenti che stanno cambiando identità e forma. Secondo la definizione del dizionario Treccani «[...] l'ufficio è un qualsiasi locale in cui si esercitano attività professionali e che non coincide con la propria abitazione».

L'evoluzione nel corso degli anni e il dibattito su funzionalità e ruolo ne hanno ampliato tuttavia il significato: l'ufficio oggi è spazio e concetto (Johansen, Press and Bullen, 2023) ed è così radicato nell'immaginario collettivo che da un lato rappresenta lo spazio fisico, dall'altro lo supera per descrivere tutti i processi lavorativi e le interazioni sociali che caratterizzano il lavoro.

Su queste premesse il contributo riporta un'indagine sul tema, condotta in uno stato iniziale di ricerca, attraverso due fasi. Nella prima fase l'analisi della letteratura ha permesso di inquadrare l'evoluzione cronologica del concetto di ufficio: gli spazi stanno cambiando per integrare dinamiche ibride, contribuendo a un cambiamento socioculturale dei luoghi di lavoro; tali spazi riflettono l'evoluzione della società e sono un campo di sperimentazione progettuale per l'Architettura e il Design. Nella seconda fase sono state indagate le attività partecipative sul campo utili a esplorare lo scenario, introducendo il tema dei dati come strumento per comprendere esperienze e percezioni dei dipendenti negli spazi di lavoro. I dati rappresentano moduli quanti-qualitativi che combinati generano sistemi strutturati di informazioni per comunicare nuova conoscenza, rivelare schemi comportamentali e integrare strumenti per gestire le attività lavorative.

Nel complesso il contributo mira a delineare il cambio paradigmatico degli spazi di lavoro da moduli chiusi e individualistici a sistemi aperti e condivisi.

L'evoluzione del modulo ufficio | La società contemporanea identifica nel lavoro una componente fondamentale della vita di ogni individuo. Lavorare, ovvero riporre le proprie energie fisiche e intellettuali per produrre beni, servizi o conoscenza, è un'attività che influisce sulla percezione individuale, sui ruoli e sulle responsabilità (Ahrentzen, 1987). Per quanto discutibile, il lavoro definisce una posizione sociale e l'ambiente spaziale in cui le attività lavorative vengono svolte, influenzando a sua volta l'identificazione e lo status, sostenendolo o ostacolando. La concezione degli spazi di lavoro e dei relativi comportamenti è stata influenzata da teorie manageriali, istruzione e cambiamenti socioeconomici (Budd, 2001).

Con la rivoluzione industriale si assiste alla nascita dei primi edifici adibiti a ufficio che, in parallelo a una netta separazione degli spazi per favorire la concentrazione del singolo, esplorano i vantaggi di una disposizione aperta e condivisa dai dipendenti. Dall'inizio del 1900 fino agli anni '60 l'ufficio è costruito sui principi del Taylorismo, un modello basato su gerarchia, supervisione e con-

trollo (Edgell, Gottfried and Granter, 2016), che determina una sistematizzazione delle postazioni di lavoro: blocchi distribuiti su lunghe file intervalate da corridoi, con muri e porte che delimitano i diversi livelli gerarchici. L'unità di misura è l'efficienza del singolo nello svolgere determinati compiti che porta a una deumanizzazione degli spazi (Taskin, Parmentier and Stinglhamer, 2019).

Negli anni '60 Designer e Architetti iniziano a percepire l'importanza di valorizzare gli aspetti umani: gli uffici vengono costruiti adottando una nuova unità di misura che mette al centro la persona, la cosiddetta 'person-environment fit' (P-E fit; Stalworth and Kleiner, 1996). Essa si basa sull'assunto che i comportamenti sono una funzione delle persone in un determinato ambiente, richiedendo sia la capacità dell'ambiente di soddisfare i bisogni della persona sia la capacità della persona di gestire le esigenze dell'ambiente. Questa relazione si esplicita su tre scale (Fig. 1): progettazione della singola postazione, dell'area di lavoro e dell'ufficio, inteso come contenitore più ampio (Danielsson and Bodin, 2009).

In quegli anni, il primo ufficio progettato tenendo conto del fattore umano è il Bürolandschaft (o ufficio panoramico). Il modello, di matrice tedesca, propone una distribuzione organica e fluida delle postazioni per favorire il lavoro in team e ridurre le barriere tra dipendenti e manager (Budd, 2001). L'uso di elementi mobili di separazione dello spazio, tuttavia, non è sufficiente a rendere il nuovo approccio più egualitario, rimarcando ancora l'impostazione gerarchica del lavoro.

Nel 1964, il sistema modulare Action Office, progettato da Robert Propst e George Nelson per Herman Miller, si concentra sulla dimensione umana del lavoro. Secondo Propst (1968) il lavoro d'ufficio è un lavoro mentale, il cui sforzo è legato al miglioramento ambientale delle proprie capacità. Il movimento è quindi alla base dell'Action Office che consente di spostarsi e di modulare la postazione, favorendo benessere e produttività. Ciò che caratterizza il sistema è la cura nelle finiture e nell'uso di colori, introducendo per la prima volta aspetti estetici, di modularità e flessibilità nelle postazioni di lavoro. Proprio questi aspetti ne determinano il fallimento, in quanto scelte di design e architettura vengono ancora poco comprese dalle classi manageriali. Tale fallimento evidenzia la forte influenza che i complementi d'arredo hanno nel garantire l'efficacia delle trasformazioni spaziali.

Prodotti come scrivanie, sedie, cassettiere e pareti divisorie – le componenti base per una postazione di lavoro – necessitano di essere progettate per accogliere bisogni di modularità senza impattare la funzionalità. Per le aziende del settore diventa fondamentale ragionare sui principi di componibilità degli elementi, standardizzazione delle dimensioni e funzionalità dei materiali per venire incontro a fattori gestionali, economici e tecnologici.

La modularità dell'Action Office viene presto interpretata come occasione per aumentare il numero di postazioni riducendo i costi; seguono due nuovi approcci di gestione dello spazio: l'Open Plan Office (OPO) e il cubicolo. L'OPO è un ambiente aperto in cui i dipendenti condividono postazioni senza muri, per offrire apertura e flessibilità (Danielsson and Bodin, 2009; Fig. 2). Per delineare l'apertura di tali spazi, negli anni '70 si diffondono i cubicoli, strutture di pannelli divisorii disposti a griglia per suddividere lo spazio in piccole

celle o moduli, mantenendo i vantaggi economici dell'OPO (Baiardi, 2018). Questa disposizione genera però un forte senso di alienazione, in quanto ogni blocco racchiude una postazione singola e l'altezza dei pannelli impedisce l'interazione con altri colleghi e la percezione dello spazio circostante (Fig. 3). Nonostante ciò il boom tecnologico degli anni '80 e il conseguente aumento dei 'colletti bianchi' porta il cubicolo a diventare la soluzione migliore per costi-benefici, trasformando le aree di lavoro in infinite 'cube-farm' (Bird, 2020).

Tra il 1950 e il 1990 Design e Architettura devono rispondere a principi organizzativi ancora influenzati dai modelli del lavoro in fabbrica (Edgell, Gottfried and Granter, 2016); il focus è su controllo e produttività e le postazioni di lavoro promuovono individualismo e gerarchia con strutture razionali e pulite. In questo contesto il modulo è fortemente pratico e geometrico, con combinazioni flessibili e superfici divisorie che prediligono lo sviluppo verticale: l'unico fattore progettuale considerato è la privacy che garantisce, almeno parzialmente, un isolamento visivo e acustico; mancano però elementi per stimolare l'interazione, come l'accesso visivo, la prossimità fisica e l'uguaglianza della postazione di lavoro (Zerella, von Treuer and Albrecht, 2017), che influiscono positivamente su comunicazione, relazioni e cultura organizzativa.

La visione modulare dell'ufficio vive una seconda fase di sviluppo – dal 2010 e ancora in corso – in cui la componente fisica lascia spazio a quella astratta, fatta di processi, relazioni e scambi di informazioni. Ciò che dà inizio a questa fase è il concetto di networking, che grazie agli sviluppi tecnologici porta l'ufficio a trasformarsi in un luogo di scambio e d'incontro (Baiardi, 2018): diviene centrale la componente umana, coinvolgendo il benessere fisico e mentale dei lavoratori (Bencivenega and Camocini, 2022). Uno dei principali cambiamenti è il passaggio da postazioni di lavoro fisse a postazioni non territoriali (Kim et alii, 2016; Figg. 4, 5): flexi-desk, hot desking e desk-sharing, sono alcuni dei termini utilizzati per descrivere nuovi modi in cui i dipendenti interagiscono con l'ufficio fisico. Alla base vi è il principio dell'Activity-Based Workspace (ABW), introdotto per far fronte alla bassa occupazione delle scrivanie, che evidenzia come l'alternanza di spazi dedicati e comuni impatti positivamente sul lavoro di squadra, sulla collaborazione intersettoriale e sulla produttività individuale (Baiardi, 2018).

Ad accompagnare l'affermazione di nuovi modelli spaziali vi è la diffusione del lavoro da remoto, ovvero la possibilità di lavorare in un qualsiasi luogo che non sia l'ufficio (ILO, 2020) secondo il principio di 'work from anywhere at any time' (Messenger and Gschwind, 2016). Questa visione diffusa raggiunge l'apice con la pandemia del Covid-19: in un contesto emergenziale la postazione di lavoro viene ricreata, per quanto possibile, all'interno delle mura domestiche e il modulo ufficio diventa intangibile: esso si smaterializza in un computer portatile o in uno smartphone, nella cornice di una webcam o nel box di una chat (Figg. 6, 7), mentre riunioni, conversazioni, brainstorming e coordinamento delle attività diventano schermate condivise e slot sul calendario (Fig. 8).

Le tendenze progettuali contemporanee fanno emergere un processo di reversibilità: l'ufficio nasce per riunire moduli su ordine di grandezza

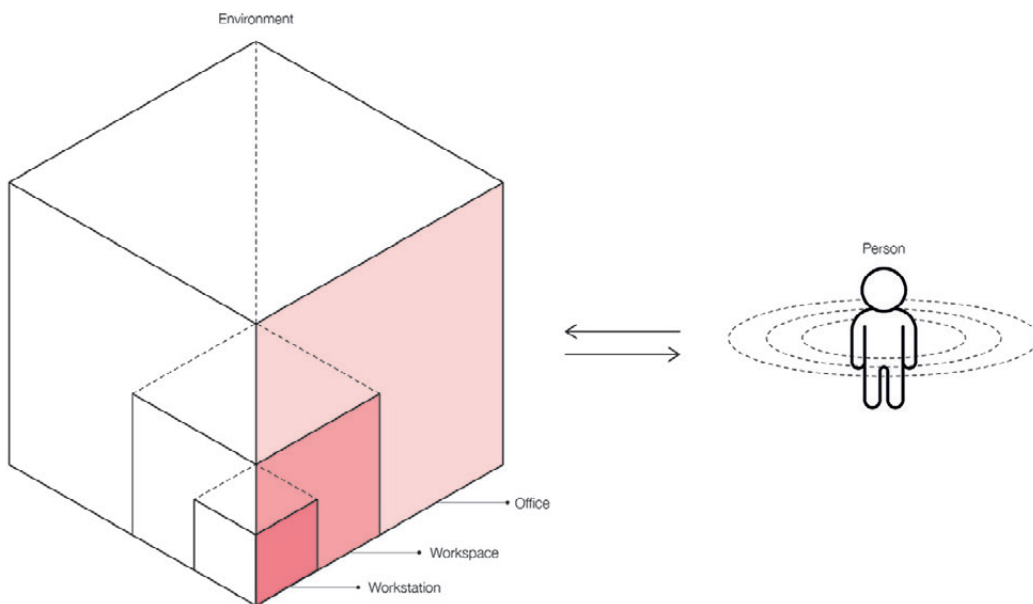


Fig. 1 | Person-Environment Fit (credit: P. Tamborrini and S. Cretaio, 2023).

crescente, per efficientare la sincronizzazione e la quantificazione del lavoro; oggi il processo si sta invertendo e l'ufficio è sempre più scomposto e flessibile nelle sue componenti (Fig. 9). Tuttavia l'analisi della letteratura evidenzia una carenza di dibattito su come le componenti fisiche e virtuali possano coesistere in contesti ibridi; l'adozione di soluzioni non-territoriali stride con la necessità umana di trovare conforto in una routine. Inoltre l'utilizzo diffuso di strumenti di comunicazione remota negli spazi di lavoro introduce un ulteriore livello di complessità. La mancanza di confini della dimensione virtuale limita i processi di creatività e interazione promossi dagli spazi fisici (Zurlo, 2019) e il superamento di tale limite permette di contribuire alla ricerca da parte delle aziende dell'equilibrio ottimale tra i requisiti dello spazio fisico e i limiti della dimensione virtuale.

Multi-dimensionalità degli spazi di lavoro | L'analisi dello stato dell'arte evidenzia la dimensione spaziale e tecnologica dell'ufficio, ovvero come le componenti fisiche e architettoniche modellano la percezione del lavoro, restituendo gli strumenti di comunicazione virtuale che hanno avviato un processo di dematerializzazione. Alla base di queste dimensioni vi è anche una forte dimensione organizzativa, con modelli e principi che influiscono sulle scelte progettuali.

Dalla letteratura scientifica emergono altre tre dimensioni, quella semantica, sociale e temporale che fanno riferimento ad aspetti socioculturali, la cui influenza sugli spazi di lavoro è fondamentale per lo sviluppo di soluzioni progettuali. Fortemente legata alla dimensione spaziale è quella semantica, ovvero l'insieme di significati, valori e percezioni che nascono dall'interazione delle persone con un determinato spazio e che – negli spazi di lavoro – si manifestano tramite strumentalità, estetica e simbolismo (Rafaeli and Vilnai-Yavetz, 2004). L'strumentalità (o usabilità) è la capacità dello spazio di facilitare il raggiungimento di determinati obiettivi; l'estetica racchiude le esperienze sensoriali (colori, odori), formali e simboliche (che producono piacere); il simbolismo si riferisce alle associazioni suscitate dallo spazio fisico di

un'organizzazione e che a loro volta collegano l'organizzazione a determinati valori.

La dimensione sociale racchiude invece il sistema di relazioni su cui si basa una progettualità multiscale. Sul singolo individuo vanno osservati i principi di flessibilità, produttività e benessere; per il team di lavoro o unità organizzativa, vanno esplorati gli schemi collaborativi, il ruolo degli strumenti virtuali e la comunicazione asincrona; su scala aziendale la progettualità va esplicitata nella gestione degli ambienti e nelle aspettative dei suoi dipendenti; va infine compreso come le suddette scelte progettuali interagiscono con il percepito collettivo (Microsoft, 2022). La dimensione temporale è infine rappresentata da tutti gli eventi storici e sociali che influenzano lo sviluppo degli spazi di lavoro: dalla rivoluzione industriale fino alla pandemia, ogni componente lavorativa è stata plasmata in risposta ai cambiamenti introdotti.

Una volta identificate le dimensioni modulari possono essere raggruppate in un grafico (Fig. 10) in cui ogni dimensione rappresenta un modulo che contribuisce alla definizione del concetto di ufficio; ogni modulo è a sua volta suddivisibile in categorie che contengono concetti, teorie e modelli. Il grafico mette in evidenza le relazioni tra le varie dimensioni a partire dalla concezione dell'ufficio come spazio e come insieme di processi, per dimostrare che ogni modulo non è da considerarsi a sé, ma è parte di un sistema più ampio. Il grafico diventa così uno strumento progettuale per definire soluzioni innovative che rispondano alle esigenze della società lavorativa contemporanea.

Il contesto di analisi | Gli spazi di lavoro si differenziano per ambiti professionali, ma è nelle aziende che si trova una forte relazione tra pratiche lavorative e modulo, perché esse sono sistemi organizzativi complessi in cui diversi attori interagiscono su vari livelli. La componente fondamentale delle aziende, su cui si concentra la ricerca, è il 'lavoratore di concetto', ovvero il lavoratore che svolge attività cognitive non di routine creando, manipolando o analizzando informazioni (Microsoft, 2021); il suo lavoro può essere svolto anche a distanza, poiché non richiede attrezzature spe-

cifiche o l'interazione diretta con i clienti (McKinsey & Company, 2021).

L'attenzione a questo utente all'interno della ricerca deriva dalla collaborazione con un'azienda italiana nel settore delle telecomunicazioni¹; l'obiettivo è studiare le percezioni dei dipendenti rispetto alle nuove soluzioni spaziali e organizzative implementate nelle sedi aziendali. Dal 2021 l'azienda ha avviato un processo trasformativo delle proprie sedi, adattandole alle nuove modalità di lavoro agile; con il rientro in ufficio avvenuto nel 2022 i dipendenti si sono confrontati con soluzioni di maggiore apertura degli spazi e piena condivisione delle postazioni di lavoro, abbandonando definitivamente l'ufficio singolo. A quasi due anni dall'introduzione dei cambiamenti, iniziano a diventare evidenti le problematiche nella gestione della varietà di ambienti e nella comunicazione interna; per garantire la sostenibilità sociale ed economica degli spazi esistenti e futuri è necessario individuare delle soluzioni mirate ed efficaci nel lungo termine.

Metodologia | L'analisi dello stato dell'arte ripercorre le principali fasi di sviluppo degli ambienti lavorativi nei campi del design e dell'architettura, individuando forti connessioni con le aree del management, della sociologia e della tecnologia. La collaborazione aziendale permette di affiancare alla ricerca teorica un'esplorazione sul campo e a seguito di una raccolta dati quantitativa, per inquadrare l'ecosistema aziendale, si è passati a un'analisi qualitativa attraverso dei focus group, per verificare le osservazioni emerse dalla bibliografia. I focus group coinvolgono direttamente i dipendenti, il cui ruolo di utenti finali permette di tradurre le loro percezioni, opinioni e attitudini in soluzioni tangibili (Bencivenga and Camocini, 2022); attraverso tre sessioni i dipendenti sono stati guidati in attività di brainstorming per inquadrare il contesto, esplorare il presente e immaginare il futuro (Figg. 11, 12).

L'analisi delle loro osservazioni introduce il dato come risorsa per le attività di ricerca; la rappresentazione delle informazioni raccolte tramite composizioni grafiche permette di presentare i risultati in modo facilmente comprensibile e comunicabile (Fagnoni, 2023; Fig. 13). La combinazione delle osservazioni emerse dalla revisione della letteratura e dall'analisi dei focus group permette l'identificazione di sei direzioni progettuali (Fig. 14) che rappresentano il punto di partenza per le fasi di ricerca applicata, sviluppo di soluzioni e sperimentazione. Ogni direzione progettuale evidenzia un tema emerso durante i focus group: identità, personalizzazione, flessibilità, improvvisazione, comunicazione agile, benessere aziendale e condivisione. Le sei direzioni inquadrano le esigenze nei confronti del mondo fisico e della distribuzione degli spazi, che devono tenere conto di aspetti culturali; le restrizioni burocratiche e la componente tecnologica risultano invece meno sentite dai dipendenti.

Il ruolo dei dati nella progettazione dei futuri spazi di lavoro | I dati permettono ai Designer di elaborare osservazioni per una progettazione innovativa e sostenibile degli spazi di lavoro e alle aziende di comprendere in maniera consapevole il contesto di riferimento per agire efficacemente (Gaiardo et alii, 2022). Così come il concetto di ufficio

può essere analizzato attraverso le sue dimensioni modulari, anche il dato, nella sua forma essenziale, è un modulo: se preso singolarmente è un'entità astratta, ma se correlato con altri dati può metter in evidenza insiemi di relazioni che possono essere comunicate tramite un linguaggio grafico-visivo, quello della data visualization, in grado di rivelare nuovi significati progettuali. La raccolta di dati dà quindi vita a un sistema strutturato, modulare, implementabile tramite componenti, ma che funziona solo se le parti sono relazionate tra loro.

La relazione tra dati e spazi di lavoro non è solamente figurativa; i dati rappresentano da tempo una risorsa fondamentale nella gestione di capitale umano e lavoro, tanto da parlare di un fenomeno di 'datafication of the workplace' (Sánchez-Monedero and Dencik, 2019). L'espressione fa riferimento al largo uso di strumenti e modelli data-driven a supporto delle fasi di assunzione, controllo dei dipendenti, valutazione e gestione delle prestazioni. In particolare le fonti evidenziano come le aziende utilizzino tecnologie basate sui dati per monitorare la produttività sul posto di lavoro, ma non mancano tuttavia criticità in merito ai diritti alla privacy e alla necessità di normative per proteggere i lavoratori (Ebert, Wildhaber and Adams-Prassl, 2021).

Per avvalorare la relazione dati-aziende è necessario spostare l'attenzione dai dati sulla produttività ai dati generati dalle interazioni persone-spazio; poiché la soddisfazione dei dipendenti e la produttività percepita sono fortemente legate agli ambienti di lavoro (De Been and Beijer, 2014), il monitoraggio dei dipendenti non garantisce un'efficacia delle attività lavorative. Al contrario, gli approfondimenti data-driven sulla progettazione degli spazi possono supportare il benessere dei dipendenti e mitigare gli effetti negativi delle soluzioni attualmente in uso (Bencivenga and Camocini, 2022). Integrando approcci generativi – in cui il progettista coinvolge e facilita i dipendenti nel visualizzare scenari futuri (Fagnoni and Olivastrì, 2019) – l'attenzione si sposta sull'esperienza dell'utente; ciò garantisce un miglioramento socioculturale della percezione del dato in quanto generato tramite processi visibili e consapevoli (Casiddu et alii, 2022).

A differenza di un approccio quantitativo, che svolge un'analisi mirata su caratteristiche specifiche di un contesto, l'approccio qualitativo permet-

te di capire come gli individui vedono, vivono e interagiscono con il contesto preso in esame (Marino, 2022). I focus group svolti sono stati utili all'interno della ricerca in quanto una volta conclusi si è passati all'analisi delle informazioni raccolte, che sono state organizzate e filtrate attraverso grafici interattivi: le visualizzazioni permettono di identificare i bisogni percepiti rispetto alle nuove disposizioni spaziali; tra questi vi è la 'categorizzazione', ovvero la necessità di creare degli ambienti adatti a specifiche esigenze e a diverse modalità di lavoro.

Segue poi l'aspetto della 'personalizzazione' secondo principi di identificazione delle attività e dei valori aziendali, tramite soluzioni che rendano più familiare il contesto lavorativo. Emerge anche il tema della 'modularità degli ambienti', dovuto alla conformazione degli attuali open space che lasciano poco spazio ad attività individuali (Fig. 15).

Conclusioni, limiti e sviluppi futuri | L'esperienza del Covid-19 restituisce valore al dibattito sulle modalità di lavoro e il concetto di ufficio è messo in discussione come mai prima d'ora; il tema degli spazi è associato alla necessità di flessibilità, nei modi, nei luoghi e nei tempi di svolgimento, tanto da far coniare il termine 'officeverso' (in italiano ufficio-verso) per indicare «[...] the future anytime / anyplace world of where you will work, when you will work, and how you will work» (Johansen, Press and Bullen, 2023, p. 2). La dematerializzazione degli spazi ha ridotto l'ufficio a un ambiente virtuale, in cui computer, piano d'appoggio, connessione wi-fi e sedia sono gli unici requisiti fisici: le soluzioni emergenziali hanno reso il lavoro da remoto una realtà che non era ancora riuscita a farsi spazio in maniera concreta. A seguito della pandemia, le modalità lavorative sono divenute varie e complesse, con scenari ibridi che necessitano di un miglior equilibrio tra attività, collaborazione e benessere individuale.

Nonostante le attività di indagine si concentrino su contesti lavorativi ibridi in cui la tecnologia è una componente imprescindibile, l'analisi della letteratura considera modelli organizzativi antecedenti e identifica i principi di modularità, flessibilità e collaborazione – centrali nella società lavorativa contemporanea – già all'interno di soluzioni orientate all'efficienza. L'Action Office è tra tutti promo-

tore di una modalità di lavoro incentrata su comportamenti umani e varietà di attività, tanto da poterlo considerare il precursore dell'approccio ABW. Cosa cambia è il modello organizzativo e la scala umana di riferimento: nel primo la differenziazione delle attività è focalizzata sul singolo, nel secondo l'idea viene estesa a tutta l'organizzazione. Il passaggio dal rigido ufficio taylorista all'Action Office (modulare ed economico) e all'ABW (flessibile e non territoriale) rappresenta l'evoluzione degli spazi di lavoro come risposta all'apprendimento organizzativo (Wohlers and Hertel, 2017).

È fondamentale integrare approcci qualitativi in cui l'utente finale è direttamente coinvolto nelle fasi progettuali. Le analisi post-occupazionali sono strumenti essenziali per raccogliere dati sulla percezione degli ambienti di lavoro (van der Voordt and Maarleveld, 2006). Nonostante il riscontro efficace dei focus group, ci sono alcuni limiti di cui tenere conto: è stato coinvolto un numero ridotto di partecipanti rispetto al totale dei dipendenti in azienda e ciò rende i risultati poco rappresentativi. Per colmare questo gap è utile affiancare attività osservative di analisi congiunta su un numero maggiore di persone, per valutare attributi come supporto alla produttività, privacy e gestione degli spazi; inoltre è importante ripetere le attività nelle diverse fasi della ricerca per monitorare cambiamenti nella percezione dei contesti e coinvolgere gli utenti nelle decisioni; è stato dimostrato come la loro partecipazione al processo di progettazione ha effetto positivo sull'adattamento delle persone nel posto di lavoro (Bencivenga and Camocini, 2022).

I nuovi flussi lavorativi sono generatori di informazioni, know-how e comportamenti che diventano un mezzo per soluzioni innovative e sostenibili. Con un approccio data-driven l'obiettivo della ricerca è identificare e progettare soluzioni per un ambiente di lavoro sostenibile. A partire dalla sistematizzazione delle dimensioni modulari dell'ufficio il saggio monitora l'evoluzione delle soluzioni spaziali per integrare dinamiche ibride.

Su queste basi è possibile strutturare le successive fasi esecutive e sperimentali della ricerca; la visualizzazione dell'esperienza tra utente e spazi di lavoro permette di rivedere i principi dei modelli spaziali contemporanei in relazione ai comportamenti e, allo stesso tempo, di valorizzare il ruolo

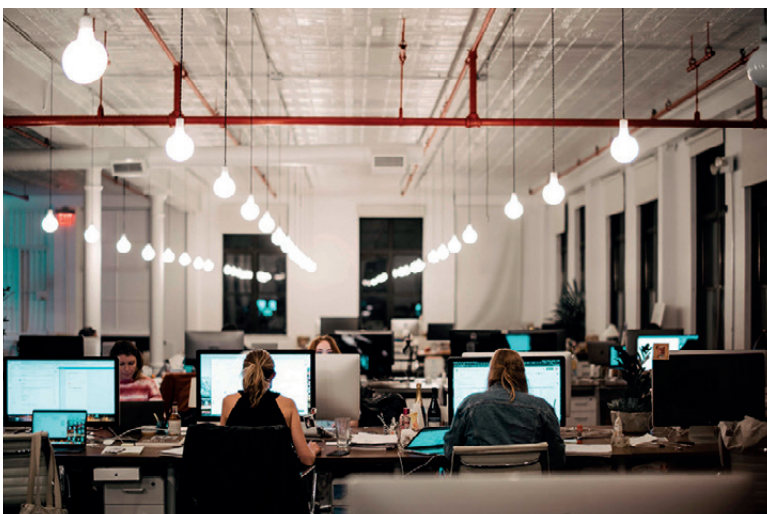


Fig. 2 | Open Plan Office (credit: I. Andrade, 2020).

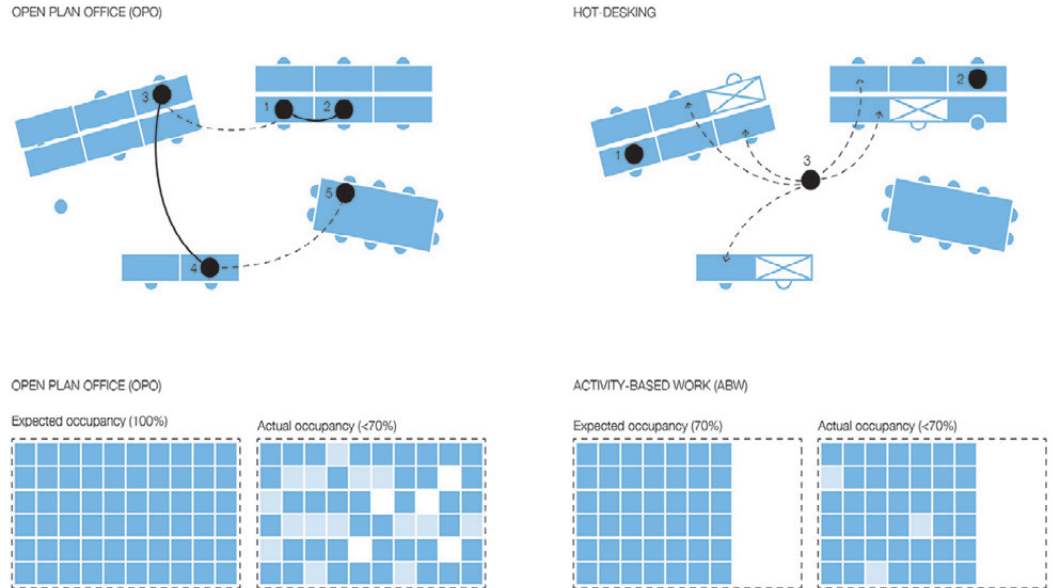


Fig. 3 | Cube farm (source: vintag.es, 2019).



Fig. 4 | Desk-sharing office (credit: Copernico Zuretti, 2020).

Fig. 5 | Comparing an open plan office with hot desks and activity-based workplaces (credit: P. Tamborrini and S. Cretai, 2022).



che i dati hanno nei processi decisionali di sistemi organizzativi. I dati, come le parole, comunicano, raccontano e cambiano di significato a seconda del contesto (Fagnoni, 2023). Nelle aziende con struttura complessa ramificata in dipartimenti con diverse prospettive, i dati diventano un linguaggio universale per allineare le azioni progettuali. Le soluzioni possono poi essere replicate al di fuori della singola azienda, esplorando altri settori con dinamiche simili.

The workplace transcends a physical environment with well-defined boundaries today: the pandemic era has disrupted workers' dynamics and rhythms. The office has been redefined as a space, while the digital environment has been integrated with the physical one through tools and platforms that transform communication processes and knowledge exchange. This contribution aims to explore the office – a unit that can be used to measure performance, productivity, interaction, and exchange of information – as a module made up of components currently undergoing changes in identity and form. According to the definition in the Treccani dictionary, an office is any room where people carry out professional activities, that is, a space unrelated to their home.

However, the evolution of the office over the years and the debate on its functionality and role have broadened its meaning: an office today is a space and a concept (Johansen, Press and Bullen, 2023), which is so rooted in the collective imagination that, on the one hand, it represents a physical space, while, on the other, it overcomes such a representation to describe the processes and social interactions that characterise work.

Based on these two points, the paper presents a study on the subject conducted in two steps through an initial phase of research. In the first step, a literature analysis was conducted, which allowed us to frame the chronological evolution of the office: such spaces are changing to integrate hybrid dynamics, thereby contributing to a socio-cultural change in the workplace; these spaces reflect the evolution of society and are a possible field of experimentation for Architecture and Design. In the

second step, participatory field activities were conducted to explore the scenario, and the theme of data as a tool to understand the experiences and perceptions of employees in the workplace was introduced. Data are quantum-qualitative modules that can be combined and generate structured information systems to communicate new knowledge, reveal behavioural patterns, and integrate tools to manage work activities.

This contribution aims to describe the paradigmatic shift of workspaces from closed and individualistic modules to open and shared systems.

The evolution of the office module | Contemporary society identifies work as a fundamental component of every individual's life. Working, that is, putting one's physical and intellectual energies into producing goods, services or knowledge, is an activity that affects individual perceptions, roles, and responsibilities (Ahrentzen, 1987). Although questionable, work defines a social position and the space where activities are executed. Therefore, social position and workspaces impact people's identification and work status, either supporting or hindering it. The concept of workspaces and their behaviour has been influenced by managerial theories, education, and socio-economic changes (Budd, 2001).

The first office buildings were created during the Industrial Revolution and, in parallel with a clear separation of spaces to encourage the concentration of individuals, the advantages of an open and shared arrangement of employees were explored. From the beginning of 1900 until the 1960s, the office was built on the principles of Taylorism, that is, on hierarchy, supervision, and control (Edgell, Gottfried and Granter, 2016), which led to a systematisation of workstations: blocks distributed along long rows interspersed with corridors, with walls and doors that outlined the different hierarchical levels. The unit of measurement was the efficiency of an individual in performing specific tasks, which led to the dehumanisation of spaces (Taskin, Parmentier and Stinglhamber, 2019).

In the 1960s, Designers and Architects began to perceive the importance of enhancing human factors: offices were built by adopting a new unit of measurement that focused on the person, the

'person-environment fit' (P-E fit; Stallworth and Kleiner, 1996). Such a concept assumed that behaviours are a function of people in a given environment, and both the ability of the environment to meet the needs of the person and the ability of the person to manage the needs of the environment were required. This relationship can be made explicit on three scales (Fig. 1): the design of a single workstation, the workspace, and the office, here intended as a larger container (Danielsson and Bodin, 2009).

In the 1960s, the first office designed considering the human factor was the Bürolandschaft (or landscape office). This German model offered an organic and fluid distribution of workstations to encourage teamwork and reduce barriers between employees and managers (Budd, 2001). However, using mobile space separation elements was insufficient to make the new approach more egalitarian while still emphasising the hierarchical approach to work. In 1964, the Action Office modular system, designed by Robert Propst and George Nelson for Herman Miller, focused on the human dimension of work. According to Propst (1968), office work is mental work, the effort of which is linked to the environmental improvement of one's own abilities. The Action Office relied on movements to switch and modulate the workstation, which promoted well-being and productivity. The system's uniqueness lay in its attention to detail in finishes and the use of colours, which added aesthetic features, modularity, and flexibility to the workplace for the first time. However, these aspects also determined its failure, as the managerial classes poorly understood the design and architecture choices. This failure highlights the strong influence that furnishing accessories have on ensuring the effectiveness of spatial transformations.

Products such as desks, chairs, drawers, and partition walls – the essential components of a workstation – need to be designed to accommodate the needs of modularity without impacting functionality. For companies in the furnishing sector, it becomes fundamental to think about the principles of modularity of the elements, standardisation of the dimensions, and functionality of the materials to satisfy the managerial, economic, and



technological requirements. The modularity of the Action Office was soon interpreted as an opportunity to increase the number of seats while reducing costs. Two new spatial management approaches were introduced: the Open Plan Office (OPO) and the cubicle. OPO is an open environment where employees share workstations without walls to offer openness and flexibility (Danielsson and Bodin, 2009; Fig. 2). In the 1970s, the construction of cubicles to manage open spaces spread: structures with grid-arranged partition panels were introduced to divide the space into small cells or modules and, in this way, the economic advantages of the OPO were maintained (Baiardi, 2018). However, such an arrangement generated a strong sense of alienation because each block contains a single location, and the height of the panels prevents interaction with other colleagues and the perception of the surrounding space (Fig. 3). Despite these criticalities, the technological development of the 1980s and the consequent increase in ‘white collar’ workers led the cubicle to become the best cost-benefit solution, thereby transforming work areas into infinite ‘cube-farms’ (Bird, 2020).

Between 1950 and 1990, Design and Architecture had to respond to organisational principles still influenced by factory work patterns (Edgell, Gottfried and Granter, 2016). The focus was on control and productivity, and workstations had to promote individualism and hierarchy with rational and clean structures. In this context, the module was highly practical and geometric, with flexible combinations and partition surfaces that preferred vertical development. The only design factor that was considered was privacy, which guaranteed, at least partially, visual and sound insulation; however, there was a lack of elements to stimulate interaction, such as visual access, physical proximity, and workplace equality (Zerella, von Treuer and Albrecht, 2017), which have a positive impact on communication, relations, and organisational culture.

The modular vision of the office experienced a second phase of development – starting in 2010 and still in progress today – in which the physical component gives way to the abstract one, made of processes, relationships, and information exchanges. This phase was initiated by considering the concept of networking, which transforms an office into a place of exchange and gathering (Baiardi, 2018). The human component becomes central and involves the physical and mental well-being of the workers (Bencivenga and Camocini, 2022). One of the significant changes has been the shift from fixed to non-territorial workstations (Kim et alii, 2016; Figg. 4, 5): flexi-desk, hot desking, and desk-sharing are some of the terms used to describe the new ways in which employees interact with the physical office. The principle of Activity-Based Workspace (ABW), which was first introduced to cope with the low employment of desks, is at the base of this concept: ABW high-

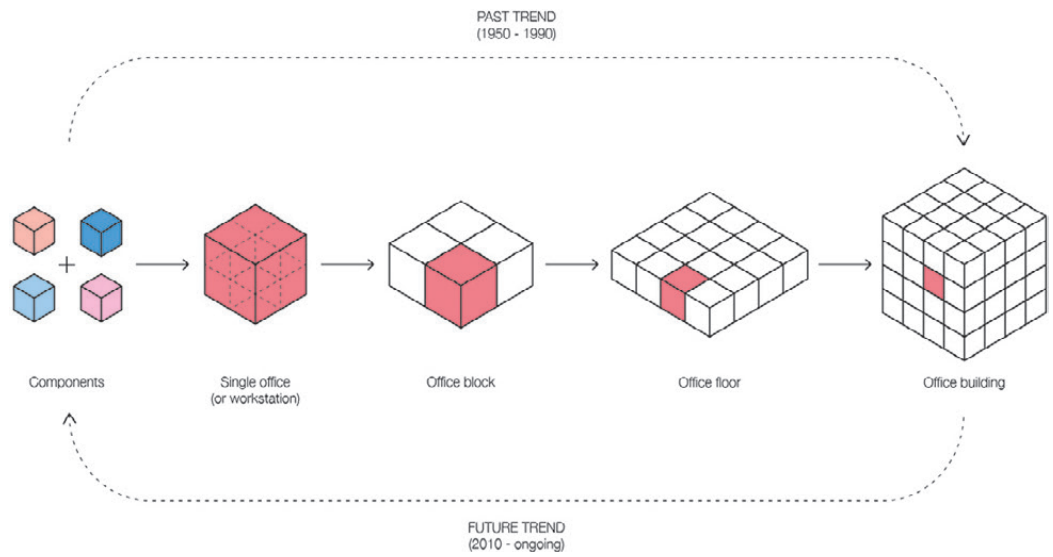
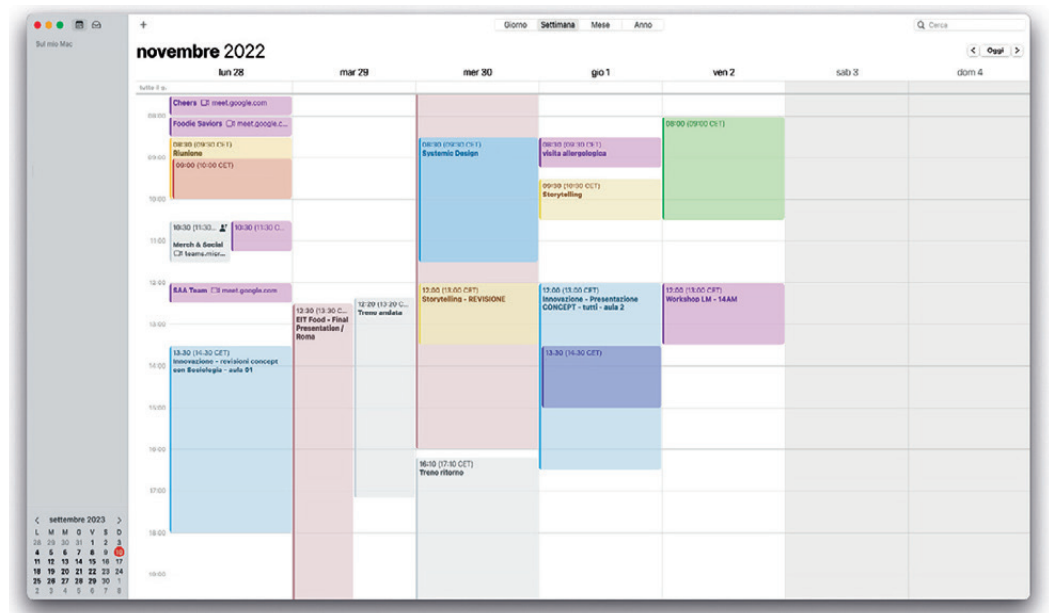
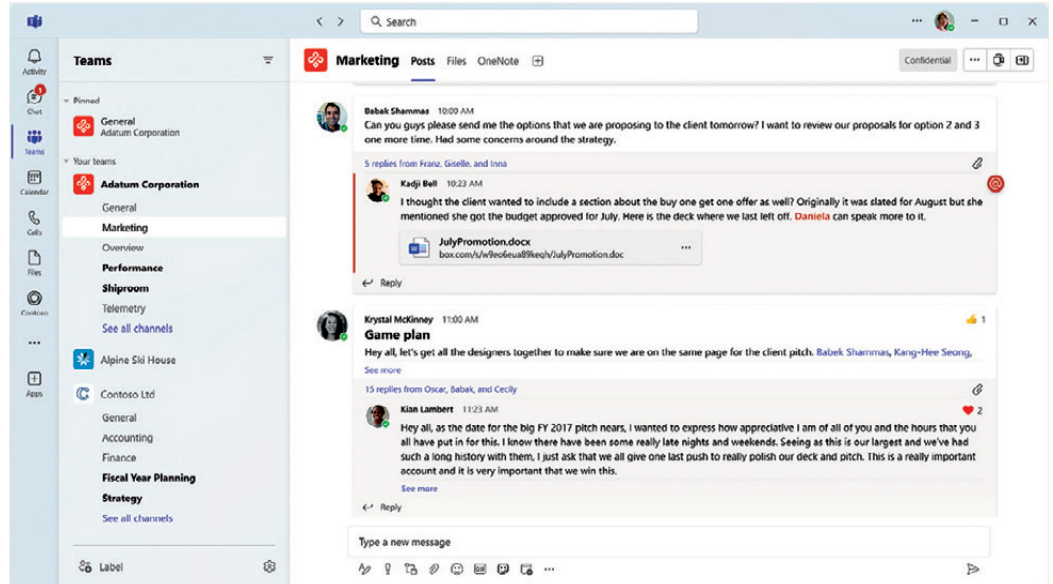


Fig. 6 | Virtual components for work organisation, Microsoft Teams (source: learn.microsoft.com, 2023).

Fig. 7 | Virtual chat, Microsoft Teams (source: Microsoft Teams UI Kit, 2023).

Fig. 8 | Organizing work through digital calendar slots (credit: P. Tamborini and S. Cretaio, 2023).

Fig. 9 | Evolution and reversibility of the office module: from 1950 till today (credit: P. Tamborini and S. Cretaio, 2023).

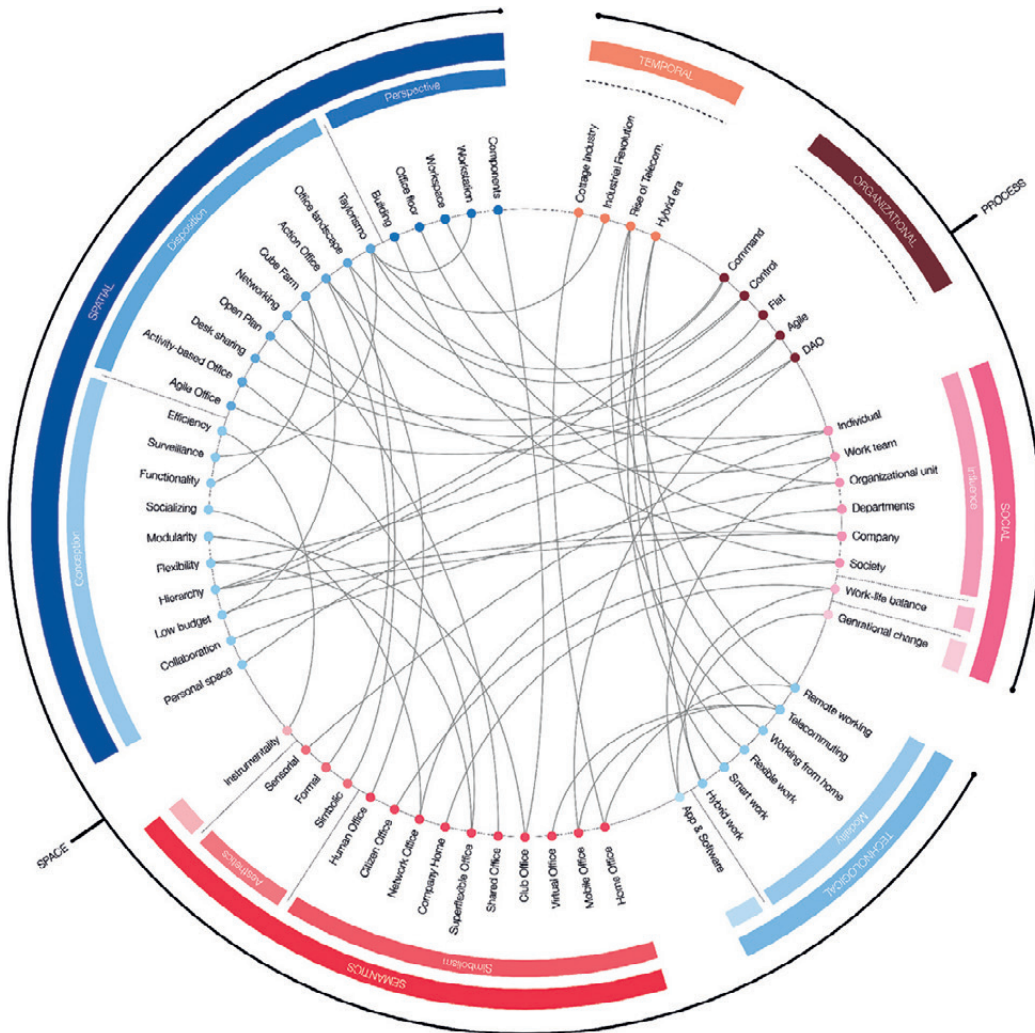


Fig. 10 | Systematizing the modular dimensions of the office (credit: P. Tamborrini and S. Cretaiu, 2023).

lights how the alternation of dedicated and common spaces positively impacts teamwork, cross-sectoral collaboration and individual productivity (Baiardi, 2018).

The diffusion of remote work supports the affirmation of the new spatial models. The core of remote work is the possibility of working in any place other than the office (ILO, 2020) according to the principle of ‘work from anywhere at any time’ (Messenger and Gschwind, 2016). This widespread vision reached a peak during the Covid-19 pandemic. In a context of emergency, the workplace is recreated, as far as possible, within the home, and the office module becomes intangible: it dematerialises into a laptop or smartphone, into the frame of a webcam, or a chat box (Fig. 6, 7), while meetings, conversations, brainstorming and the coordination of activities become shared screens and slots on one’s calendar (Fig. 8).

Contemporary design trends have led to a process of reversibility: the office was created to bring modules together in an order of increasing size, to improve the synchronisation and quantification of work; today, the process is reversing, and the office is becoming increasingly flexible and splits into its components (Fig. 9). Despite the results of the literature analysis, there is still a lack of discussion on how physical and virtual components can coexist in hybrid contexts. Adopting non-territorial solutions conflicts with the human need to find comfort in routine. Moreover, the widespread use

of remote communication tools in workspaces creates additional complexity. The lack of boundaries of the virtual dimension limits the processes of creativity and interaction promoted by physical spaces (Zurlo, 2019). Exceeding this limit allows companies to contribute to the research on the optimal balance between the requirements of physical space and the limits of the virtual dimension.

Multi-dimensionality of workspaces | The state-of-the-art analysis highlighted the spatial and technological dimension of the office, namely how the physical and architectural components, including virtual communication tools that have initiated a dematerialisation process, have shaped the perception of work. A robust organisational dimension is also at the core of these dimensions, based on models and principles that influence design choices.

The scientific literature highlighted three other dimensions, that is, semantic, social, and temporal. They refer to socio-cultural aspects whose influence on workspaces is fundamental for developing design solutions. The semantic dimension, which is closely linked to the spatial dimension, refers to the set of meanings, values, and perceptions that arise from the interaction of people with a specific space and which – in the workspace – are manifested through instrumentality, aesthetics, and symbolism (Rafaeli and Vilnai-Yavetz, 2004). Instrumentality (or usability) is the ability of a space

to facilitate the achievement of specific objectives; aesthetics encompasses sensory (colours, smells), formal, and symbolic (which produce pleasure) experiences; symbolism refers to the associations aroused by the physical space of an organisation and which in turn connect the organisation to specific values. On the other hand, the social dimension encompasses the system of relationships on which multiscale planning is based. The principles of flexibility, productivity, and well-being should be observed in the individual; collaborative schemes, virtual tools, and asynchronous communication should be explored for the work team or the organisational unit; planning in the management of environments and the expectations of employees at a company scale should be made explicit. Finally, it should be understood how design choices interact with the collective perception (Microsoft, 2022). The temporal dimension is represented by all the historical and social events that influenced the development of the workspaces, from the Industrial Revolution to the pandemic, so that every working component has been shaped in response to the introduced changes.

Once identified, the modular dimensions can be grouped in a graph (Fig. 10), where each dimension represents a module that contributes to the definition of the office concept; each module is divided into categories that contain concepts, theories, and models. Such a graph can be used to highlight the relationships between the dimensions, starting from the conception of the office as a space and as a process, to demonstrate that each module should not be considered by itself but rather as part of a more extensive system.

The context of the analysis | The layout and conception of workspaces can vary considerably, depending on the professional context, but it is in companies that there is a close relationship between work practices and the module. Companies are complex organisational systems in which different actors engage at different levels. Their fundamental component – on which the research focuses – is the ‘knowledge worker’, that is, the worker who performs non-routine cognitive activities by creating, manipulating, or analysing information (Microsoft, 2021); remote work is possible in their job since it does not require specific equipment or any direct interaction with customers (Mckinsey & Company, 2021).

In this research, attention to this type of user is derived from the collaboration of the authors with an Italian company working in the telecommunications field¹. The goal has been to study the employees’ perceptions of the new spatial and organisational solutions adopted in the offices. In 2021, the company started a transformative process of its workspaces, adapting them to the new ways of agile working. With the return to the office after the Covid-19 pandemic in 2022, the employees were confronted with increased open space solutions and complete sharing of workstations, while the idea of the single office was permanently abandoned. However, almost two years after introducing the changes, problems in managing various environments and internal communication have become evident. It appears necessary to identify targeted and effective long-term solutions to ensure the social and economic sustainability of the existing and future spaces.

Methodology | The state-of-the-art analysis traced the main stages of the development of working environments in design and architecture, identifying strong connections with the management, sociology, and technology areas. Business collaboration has allowed theoretical research to be combined with field exploration. Following quantitative data collection, a qualitative analysis was conducted through focus groups to frame the corporate ecosystem to verify the observations made during the literature review. The focus groups involved employees, whose role as end-users allowed them to translate their perceptions, opinions, and attitudes into tangible solutions (Bencivenga and Camocini, 2022). Through three sessions, employees were guided in brainstorming activities to frame the context, explore the present, and imagine the future (Fig. 11, 12).

The analysis of their observations introduced data as a resource for research activities; the representation of the collected information in graphs allowed the results to be presented in an understandable and communicable way (Fagnoni, 2023; Fig. 13). The combination of observations from the literature review and the focus group analysis led to the identification of six design directions (Fig. 14). Such directions represented the starting point for the applied research, development of solutions, and experimentation phases. Each design direction highlighted a theme from the focus groups: identity, customisation, flexibility, improvisation, agile communication, corporate well-being, and community sharing. The six directions framed the needs of the physical environment, and the distribution of spaces, which should also consider cultural aspects; bureaucratic restrictions and the

technological component are instead felt less by the employees.

The role of data in designing the future of the workplaces | Designers can use data to generate observations for the innovative and sustainable design of workspaces; at the same time, companies can gain a conscious understanding of the reference context and act effectively (Gaiardo et alii, 2022). In a similar way to an office, a datum can basically be considered as a module: if taken individually, it is an abstract entity, but if correlated with other data, it can be used to highlight sets of relationships that can be communicated through the graphic language of data visualisation, to reveal new design meanings. The defined data collection creates a structured, modular system that can be implemented using components only if the parts are interconnected. The relationship between data and workspaces is not only figurative; data have always represented a fundamental resource in the management of human capital and work, going as far as to describe a 'datafication of the workplace' phenomenon (Sánchez-Monedero and Dencik, 2019). This expression refers to the wide use of data-driven tools and models to support the phases of recruitment, employee control, evaluation, and performance management. The analysed sources show how companies use data-driven technologies to monitor productivity in the workplace. However, critical issues have emerged regarding privacy rights and the need for legislation to protect workers (Ebert, Wildhaber and Adams-Prassl, 2021).

To validate the data-business relationship, it is necessary to shift the focus from data based on productivity to data generated by people-space

interactions; since the satisfaction and perceived productivity of employees are closely linked to work environments (De Been and Beijer, 2014), the monitoring of employees does not guarantee effective work activities. However, data-driven insights into space design can support the well-being of employees and mitigate the adverse effects of current solutions (Bencivenga and Camocini, 2022). Integrating generative approaches – in which the designer involves and facilitates employees in visualising future scenarios (Fagnoni and Olivastri, 2019) – the focus shifts to the users' experience; this guarantees a socio-cultural improvement of the perception of the data, which is generated through visible and conscious processes (Casiddu et alii, 2022).

Unlike a quantitative approach, which involves carrying out a targeted analysis of specific context characteristics, the qualitative approach allows us to understand how individuals see, live, and interact with the examined context (Marino, 2022). Once completed, the focus groups allowed the collected information, which had been organised and filtered through interactive graphs, to be analysed. The visualisations allowed the perceived needs related to new spatial arrangements to be identified; these needs included 'categorisation', which is the need to create environments suitable for specific needs and different working modes.

The theme of 'customisation' then emerges, according to principles of identification of organisational activities and values through solutions that make the working environment more familiar. The theme of 'space modularity' also emerged due to the layout of the current open spaces that leaves little room for individual activities (Fig. 15).

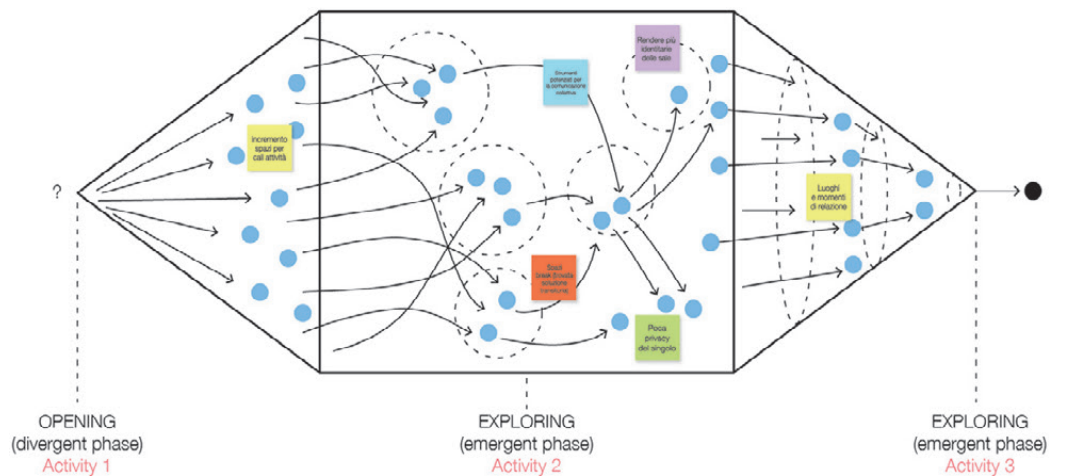
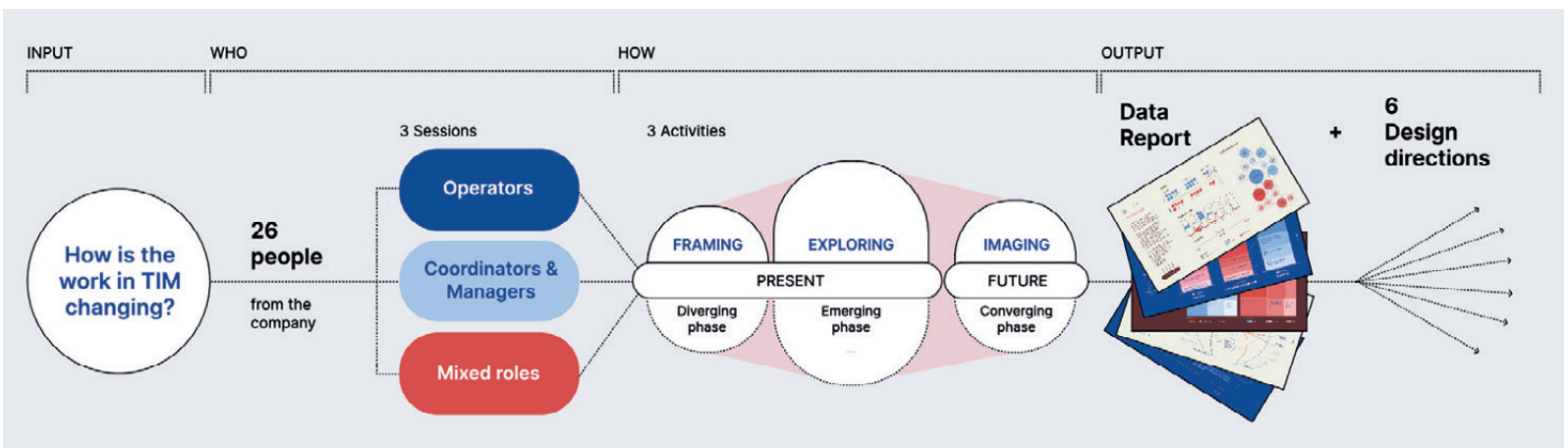
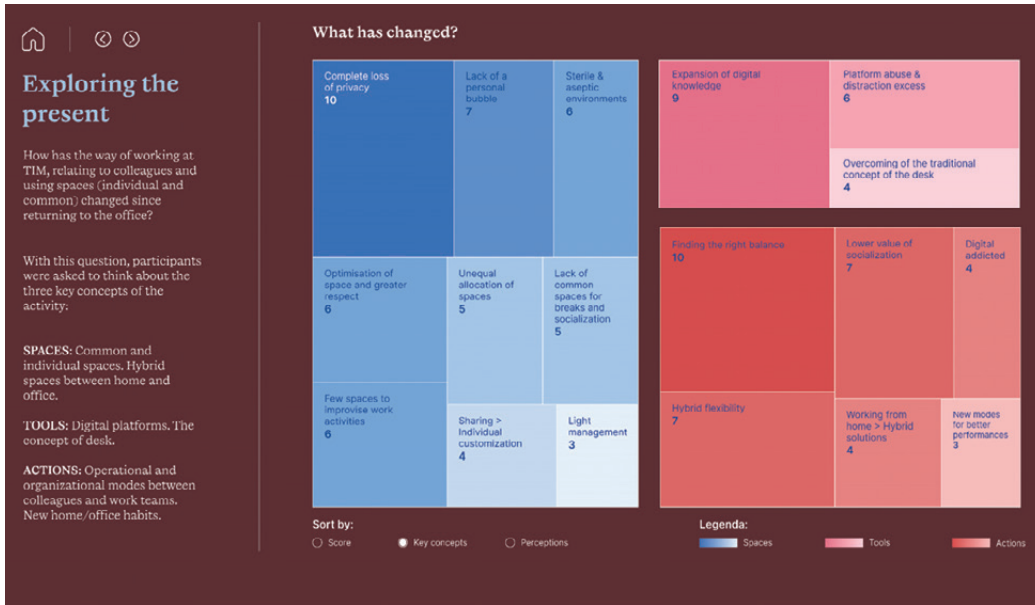


Fig. 11 | Structuring activities during a focus group according to the Game Design methodology (credit: D. Gray, S. Brown and J. Macanufo, 2010).

Fig. 12 | Process and output of the focus groups (credit: P. Tamborrini and S. Cretaio, 2022).





Conclusion, limits, and future developments |

The Covid-19 experience has enhanced the debate about working methods, and the office concept is being questioned as never before. The theme of spaces is associated with the need for flexibility in the ways, places, and timing, so much so that the term 'officeverse' has been coined to indicate «[...] the future anytime / anyplace world of where you will work, when you will work, and how you will work» (Johansen, Press and Bullen, 2023, p. 2). The dematerialisation of spaces has reduced the office to a virtual environment, where computers, tabletops, wi-fi connections, and chairs are the only requirements: remote work has become a reality thanks to emergency solutions that, however, were not sufficiently concrete. The pandemic has led to changes in working methods, with hybrid scenarios that require a better balance between activity, collaboration, and individual well-being.

While the research activities focused on hybrid work contexts in which technology is an essential component, the analysis of the literature considered previous organisational models and identified the principles of modularity, flexibility, and collaboration – which are central to the contemporary working society – and have already been included in efficiency-oriented solutions. The Action Office is one of the promoters of a type of work focused on human behaviour and various activities, and it can be considered the precursor of the ABW approach. What is different is the organisational model and the human scale of reference: in the former, the differentiation of activities is focused on the individual and, in the latter, the idea is extended to the whole organisation. The shift from the rigid Taylorist office to the Action Office (modular and economic) and the ABW (flexible and non-territorial) represents the evolution of workspaces as a response to organisational learning (Wohlers and Hertel, 2017).

Integrating qualitative approaches that involve the end user directly during the design phases is crucial. Post-employment analyses are critical to gather data on the perception of the working environment (van der Voorde and Maarleveld, 2006). Despite the effective feedback of the focus groups, there are some limits to consider: a reduced number of participants was involved compared to the total number of employees in the company, making the results unrepresentative. To bridge this gap, it would be helpful to combine observational activities of joint analysis on a more significant number of people and to evaluate such attributes as productivity support, privacy, and space management. It would also be important to repeat the activities during different phases of the research to monitor changes in the perception of contexts and to involve users in decisions; it has been shown that the participation of users in the design process has a positive effect on the adaptation of people in the workplace (Bencivenga and Camocini, 2022).

The new workflows are sources of information, know-how, and behaviours that can be used to create innovative and sustainable solutions. Using a data-driven approach, the research aims to identify and develop solutions for a sustainable work environment. The essay tracks the evolution of spatial solutions to integrate hybrid dynamics, starting from the systematisation of the modular



Fig. 13 | Visualizing the observations of the focus groups (credit: P. Tamborrini and S. Cretai, 2022).

Fig. 14 | Design directions from state-of-the-art considerations and direct observation through focus groups (credit: P. Tamborrini and S. Cretai, 2022).

Fig. 15 | Design directions based on the focus groups sample and visualisation of the results (credit: P. Tamborrini and S. Cretai, 2022).

dimensions of the office. This information can be used to organise the subsequent execution and experimental phases of the research; the visualisation of the experience between the user and the workspace allows a review of the principles of contemporary spatial models to be made in relation to behaviours and, at the same time, the role

that data play in the decision-making processes of organisational systems to be enhanced. Data, like words, communicate, convey, and change their meaning according to the context (Fagnoni, 2023). Data becomes a universal language to align project actions in companies with complex structures branched into departments with differ-

ent perspectives. The solutions could then be replicated outside the individual company by exploring other industries with similar dynamics.

Notes

1) The paper presents some observations from the first analysis phase conducted between November 2021 and September 2022 as part of the PhD Program at the Politecnico di Torino in collaboration with the TIM company. The research will last three years (2021-2024) and has been funded by a scholarship.

References

- Ahrentzen, S. B. (1987), *Blurring Boundaries – Socio-Spatial Consequences of Working at Home*, Center for Architecture and Urban Planning Research Books. [Online] Available at: dc.uwm.edu/caupr_mono/36 [Accessed 15 October 2023].
- Baiardi, L. (2018), “Un esempio di coworking e smart living a Milano | An example of coworking and smart living in Milan”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 4, pp. 137-144. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/4172018 [Accessed 11 October 2023].
- Bencivenga, M. and Camocini, B. (2022), “Post-pandemic scenarios of office workplace – New purposes of the physical spaces to enhance social and individual well-being”, in Dominoni, A. and Scullica, F. (eds), *Designing Behaviours for Well-being Spaces – How Disruptive Approaches Can Improve Living Conditions*, FrancoAngeli, Milano, pp. 90-111. [Online] Available at: hdl.handle.net/11311/1202333 [Accessed 11 October 2023].
- Bird, M. (2020), “Enter the Cube Farm”, in *MIT Sloan*, 25/11/2020. [Online] Available at: sloanreview.mit.edu/article/enter-the-cube-farm/ [Accessed 11 October 2023].
- Budd, C. (2001), “The Office – 1950 to the Present”, in Antonelli, P. (ed.), *Workspaces – Design and Contemporary Work Styles*, The Museum of Modern Art, New York, pp. 26-35. [Online] Available at: moma.org/documents/moma_catalogue_168_300133807.pdf [Accessed 11 October 2023].
- Casiddu, N., Burlando, F., Nevoso, I., Porfirione, C. and Vacanti, A. (2022), “Beyond personas – Il Machine Learning per personalizzare il progetto | Beyond personas – Machine Learning to personalise the project”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 226-233. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12202022 [Accessed 16 October 2023].
- Danielsson, C. B. and Bodin, L. (2009), “Difference in satisfaction with office environment among employees in different office types”, in *Journal of Architectural and Planning Research*, vol. 26, issue 3, pp. 241-257. [Online] Available at: [jstor.org/stable/43030872](https://www.jstor.org/stable/43030872) [Accessed 11 October 2023].
- De Been, I. and Beijer, M. (2014), “The influence of office type on satisfaction and perceived productivity support”, in *Journal of Facilities Management*, vol. 12, issue 2, pp. 142-157. [Online] Available at: doi.org/10.1108/JFM-02-2013-0011 [Accessed 11 October 2023].
- Ebert, I., Wildhaber, I. and Adams-Prassl, J. (2021), “Big Data in the workplace – Privacy Due Diligence as a human rights-based approach to employee privacy protection”, in *Big Data & Society*, vol. 8, issue 1. [Online] Available at: doi.org/10.1177/205395172111013051 [Accessed 11 October 2023].
- Edgell, S., Gottfried, H. and Granter, E. (2016), *The SAGE handbook of the Sociology of Work and Employment*, Sage Publications Ltd, London-Thousand Oaks.
- Fagnoni, R. (2023), “In certezza – Fare ricerca in design nell’era dei dati”, in Casarotto, L., Costa, P., Fagnoni, R. and Sinni, G. (eds), *Il potere del dato*, Ronzani Editore, Vicenza, pp. 21-33.
- Fagnoni, R. and Olivastri, C. (2019), “Hardesign vs Soft-design”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 145-152. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5162019 [Accessed 12 October 2023].
- Gaiardo, A., Remondino, C., Stabellini, B. and Tamborrini, P. (2022), *Il design è innovazione sistemica – Metodi e strumenti per gestire in modo sostenibile la complessità contemporanea – Il caso Torino*, LetteraVentidue, Siracusa.
- ILO – International Labour Organization (2020), *Covid-19 – Guidance for Labour Statistics Data Collection*. [Online] Available at: ilo.org/global/statistics-and-databases/publications/WCMS_747075/lang=en/index.htm [Accessed 11 October 2023].
- Johansen, R., Press, J. and Bullen, C. V. (2023), *Office Shock – Creating better futures for working and living*, Berrett-Koehler Publishers, Oakland (CA).
- Kim, J., Candido, C., Thomas, L. and de Dear, R. (2016), “Desk ownership in the workplace – The effect of non-territorial working on employee workplace satisfaction, perceived productivity and health”, in *Building and Environment*, vol. 103, pp. 203-214. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.015 [Accessed 11 October 2023].
- Marino, C. (2022), “Metodi e strumenti per il rilievo olistico”, in Gaiardo, A., Remondino, C., Stabellini, B. and Tamborrini, P. (eds), *Il design è innovazione sistemica – Metodi e strumenti per gestire in modo sostenibile la complessità contemporanea – Il caso Torino*, LetteraVentidue, Siracusa, pp. 82-85.
- McKinsey & Company (2021), *The future of work after Covid-19*. [Online] Available at: [mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/the-future-of-work-after-covid-19](https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/the-future-of-work-after-covid-19) [Accessed 11 October 2023].
- Messenger, J. C. and Gschwind, L. (2016), “Three generations of Telework – New ICTs and the (R)evolution from Home Office to Virtual Office”, in *New Technology, Work and Employment*, vol. 31, pp. 195-208. [Online] Available at: doi.org/10.1111/ntwe.12073 [Accessed 11 October 2023].
- Microsoft (2022), *Microsoft New Future of Work Report 2022 – A summary of recent research from Microsoft and around the world that can help us create a new and better future of work*. [Online] Available at: [microsoft.com/en-us/research/uploads/prod/2022/04/Microsoft-New-Future-Of-Work-Report-2022.pdf](https://www.microsoft.com/en-us/research/uploads/prod/2022/04/Microsoft-New-Future-Of-Work-Report-2022.pdf) [Accessed 11 October 2023].
- Microsoft (2021), *The New Future of Work – Research from Microsoft into the Pandemic’s Impact on Work Practice*. [Online] Available at: [microsoft.com/en-us/research/uploads/prod/2021/01/NewFutureOfWorkReport.pdf](https://www.microsoft.com/en-us/research/uploads/prod/2021/01/NewFutureOfWorkReport.pdf) [Accessed 11 October 2023].
- Propst, R. (1968), *The Office – A facility based on change*, Herman Miller, Zeeland.
- Rafaeli, A. and Vilnai-Yavetz, I. (2004), “Instrumentality, aesthetics and symbolism of physical artifacts as triggers of emotion”, in *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 5, issue 1, pp. 91-112. [Online] Available at: doi.org/10.1080/1463922031000086735 [Accessed 11 October 2023].
- Sánchez-Monedero, J. and Dencik, L. (2019), *The datafication of the workplace*. [Online] Available at: datajustice-project.net/wp-content/uploads/sites/30/2019/05/Report-The-datafication-of-the-workplace.pdf [Accessed 11 October 2023].
- Stallworth, O. E. and Kleiner, B. H. (1996), “Recent developments in office design”, in *Facilities*, vol. 14, issue 1/2, pp. 34-42. [Online] Available at: doi.org/10.1108/02632779610108512 [Accessed 11 October 2023].
- Taskin, L., Parmentier, M. and Stinglhamber, F. (2019), “The dark side of office designs – Towards de-humanization”, in *New Technology Work and Employment*, vol. 34, issue 3, pp. 262-284. [Online] Available at: doi.org/10.1111/ntwe.12150 [Accessed 11 October 2023].
- van der Voordt, T. and Maarleveld, M. (2006), “Performance of office buildings from a user’s perspective”, in *Ambiente Costruito*, vol. 6, issue 3, pp. 7-20. [Online] Available at: resolver.tudelft.nl/uuid:efee8ad6-5449-423d-904d-dbad30bf5aa9 [Accessed 11 October 2023].
- Wohlers, C. and Hertel, G. (2017), “Choosing where to work at work – Towards a theoretical model of benefits and risks of activity-based flexible offices”, in *Ergonomics*, vol. 60, issue 4, pp. 467-486. [Online] Available at: doi.org/10.1080/00140139.2016.1188220 [Accessed 11 October 2023].
- Zerella, S., von Treuer, K. and Albrecht, S. L. (2017), “The influence of office layout features on employee perception of organizational culture”, in *Journal of Environmental Psychology*, vol. 54, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvp.2017.08.004 [Accessed 11 October 2023].
- Zurlo, F. (2019), “Designerly Way of Organizing – Il Design dell’organizzazione creativa | Designerly Way of Organizing – The Design of creative organization”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 11-20. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/522019 [Accessed 19 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	10 September 2023
Revised	10 October 2023
Accepted	20 October 2023
Published	31 December 2023

MODULARITÀ COME STRATEGIA PER IL DESIGN MEDICALE

MODULARITY AS A STRATEGY FOR MEDICAL DESIGN

Carla Langella, Salvatore Carleo, Marianna De Luca

ABSTRACT

Nell'ultimo decennio le collaborazioni tra Design e ambito biomedicale sono sempre più frequenti ed efficaci grazie alla comune propensione verso una innovazione centrata sull'utente. Il Design entra in gioco dove emergono sfide irrisolte, legate soprattutto all'usabilità dei prodotti biomedicali, in particolare nel campo della medicina fisica e riabilitativa in cui gli ausili impiegati in trattamenti ed esercizi terapeutici sono spesso inadeguati ai progressi scientifici e alle complesse esigenze di pazienti e terapeuti. Attraverso l'analisi critica di alcune buone pratiche internazionali il paper promuove l'impiego di un approccio progettuale fondato sulla modularità e su potenziali kit per la medicina riabilitativa neuro-psicologica, ortopedica e logopedica. La strategia della modularità presenta in questo contesto un'opportunità per elaborare nuove soluzioni design-driven utili allo sviluppo di strumenti più flessibili, adattabili, ergonomici, confortevoli e sostenibili.

In the last decade, collaborations between Design and the biomedical field have become increasingly frequent and effective, thanks to their shared focus on user-centred innovation. Design comes into play when unresolved challenges arise, mainly related to the usability of biomedical products, especially in the field of physical and rehabilitative medicine, where aids used for therapeutic treatments and exercises are often inadequate for scientific advancements and the complex needs of patients and therapists. Through a critical analysis of international best practices, this paper promotes a design approach based on modularity and potential kits for neuro-psychological, orthopaedic, and speech rehabilitation medicine. In this context, the modularity strategy offers an opportunity to develop new design-driven solutions for more flexible, adaptable, ergonomic, comfortable, and sustainable tools.

KEYWORDS

design e medicina, modularità, flessibilità, adattabilità, personalizzazione

design and medicine, modularity, flexibility, adaptability, customisation

Carla Langella, Architect and PhD, is an Associate Professor of Industrial Design at the 'Federico II' University of Naples (Italy). She founded and has been coordinating the Hybrid Design Lab since 2006, a laboratory dedicated to the mutual relationships between design and biosciences, with a particular interest in biomimetics, design-driven materials, design for health, and the design of cultural experiences mediated by digital technologies. Email: carla.langella@unina.it

Marianna De Luca, Speech Therapist at the ASL Napoli 2 Nord (Italy), is a member of the Child Neuropsychiatry Unit and is involved in the prevention, assessment, and treatment of language, communication, voice, cognitive, learning, oral, and swallowing disorders. Email: marianna.deluca18@libero.it

Salvatore Carleo, Designer, is a PhD student at the 'Luigi Vanvitelli' University of Campania and has conducted research and experiments in medical design and design engineering in collaboration with the Hybrid Design Lab. He has participated in research projects in sustainable mobility and user monitoring with innovative companies in the Campania region. Email: salvatore.carleo@unicampania.it



Nel corso degli ultimi decenni, e in particolare dopo la pandemia da Covid-19, le sinergie tra il Design e la Medicina sono diventate sempre più frequenti e fruttuose (Bisson et alii, 2019; Lewis and Lupton, 2021; Shadlyn et alii, 2022; Bracco et alii, 2022), soprattutto nell'ambito della progettazione dei prodotti biomedicali che costituiscono uno tra i settori produttivi con maggiore grado di tecnologia, ricerca e rapidità di innovazione (Mishra and Sandhu, 2021; Fries, 2021). Poiché i dispositivi medici entrano in diretto contatto con i pazienti, lo studio della compatibilità con le specificità antropometriche e psico-fisiche degli utenti è essenziale per assicurare l'efficacia e la sicurezza del trattamento. L'apporto del Design è dunque cruciale e strategico nei processi di innovazione degli strumenti medici e nel loro adeguamento all'evoluzione degli stili di vita e delle pratiche di cura, oltre che all'avanzamento della ricerca scientifica (Privitera, Design and Johnson, 2009).

In questi processi i designer possono fare riferimento ai metodi progettuali come l'Human-centred Design (Giacomin, 2014; Melles, Albayrak and Goossens, 2021) e il Design Thinking (Ku and Lupton, 2022; Lockwood, 2014). La consapevolezza delle esigenze degli utenti e dell'impatto psico-fisico dei prodotti biomedicali su di essi consente di sviluppare soluzioni progettuali innovative e caratterizzate da elevati livelli di comfort, compliance, aderenza ed ergonomia che migliorino il coinvolgimento del paziente e le prestazioni del terapeuta (Langella and Pontillo, 2023).

Se il coinvolgimento può essere interpretato come un processo graduale di connessione tra operatore sanitario e utente, il comfort di un ausilio impiegato in trattamenti fisioterapeutici deriva da quanto risulta comodo, facile e piacevole da usare, sia dal punto di vista del paziente sia da quello dell'operatore. Con il termine 'compliance' (in italiano acquiescenza) viene definita l'attitudine del paziente ad accettare il trattamento raccomandato nei termini della prescrizione. In particolare in psicologia il termine compliance si riferisce a una risposta favorevole, senza resistenze, a una raccomandazione: dalla compliance e dal comfort deriva l'aderenza del paziente al trattamento e il rispetto delle tempistiche previste; l'aderenza terapeutica è intesa come il coinvolgimento attivo e collaborativo del paziente che partecipa alla pianificazione e all'attuazione della terapia che viene proposta come una sorta di accordo tra parti consenzienti.

L'ergonomia è particolarmente importante in questo ambito poiché comprende le capacità di apportare benefici in termini di salute, sicurezza e benessere degli utenti. La sicurezza di un trattamento terapeutico prevede che il trattamento non determini svantaggi superiori ai vantaggi ottenuti (Bright et alii, 2015): lo sviluppo di questa nuova area di azione per la cultura del progetto richiede che i designer prendano confidenza con questi principi e con le loro ricadute sul progetto e che siano propensi a collaborare sinergicamente con medici, terapisti, associazioni di pazienti e aziende produttrici. Tutto questo richiede la definizione di approcci metodologici idonei per affrontare la complessità e la multidisciplinarietà intrinseca del settore medicale (Chiapponi, 1999; Giambattista, 2019; Langella, 2021); in particolare nell'ambito della medicina riabilitativa neurologica, ortopedica e foniatrica il contributo del Design può rivelarsi molto

proficuo in termini di efficacia terapeutica e benessere degli utenti (Johnson, Das and Tyler, 2021). La medicina riabilitativa, conosciuta anche come fisioterapia, è la branca delle scienze mediche che si occupa della prevenzione, diagnosi, terapia e riabilitazione in condizioni di patologia o disabilità, congenite o acquisite. Gli specialisti e i terapisti che lavorano in questo ambito si occupano di aiutare le persone a recuperare condizioni di indipendenza migliorando la qualità della loro vita quotidiana in relazione a una inabilità o dopo un trauma, una malattia o un intervento chirurgico.

Il contributo del Design riguarda prevalentemente il progetto di ausili, strumenti e accessori che coadiuvano lo svolgimento di esercizi terapeutici nei tre principali ambiti: della riabilitazione neurologica, che si occupa dei pazienti con disabilità neurologiche, come quelle causate da ictus, lesioni del midollo spinale, sclerosi multipla, malattia di Parkinson e altre patologie neurologiche; della riabilitazione ortopedica, che si concentra sui pazienti con problemi ortopedici, come fratture ossee, lesioni legamentose, problemi articolari e interventi chirurgici ortopedici; della riabilitazione foniatrica, che si focalizza sulle disabilità comunicative e della deglutizione. Nelle diverse tipologie di terapia identificate il designer può svolgere il ruolo di facilitatore di processi di innovazione in situazioni in cui emergono esigenze irrisolte.

I progressi compiuti dalle scienze mediche nel campo della riabilitazione procedono a un ritmo notevolmente più rapido rispetto all'evoluzione degli strumenti che generalmente non riescono a stare al passo di conoscenze e metodologie o risultano ingombranti, poco ergonomici e difficilmente adattabili al variare delle caratteristiche degli utenti e delle terapie. Le aziende produttrici di dispositivi per riabilitazione sono poche e spesso non propense all'innovazione di Design; gli strumenti portatili, in particolare, non sono progettati per rispondere ai molteplici e complessi bisogni di utenti e operatori. Per tali ragioni spesso i terapisti tendono ad autoprodurre i loro ausili, adattando e assemblando materiali e oggetti provenienti da altri ambiti in base alle proprie esigenze terapeutiche.

Alla luce delle superiori premesse e al fine di superare le criticità citate l'articolo promuove un approccio modulare come possibile strategia progettuale per ottenere ausili riabilitativi più ergonomici, usabili, adattabili, flessibili e sostenibili. Il contributo mira a colmare una lacuna di attenzione rispetto a questi temi rilevata nella letteratura scientifica internazionale inerente al design medicale, che finora si è prevalentemente concentrata sul progetto di attrezzature biomedicali, di dispositivi indossabili per il monitoraggio di valori biometrici, di protesi e di ausili per la protezione individuale. L'inserimento del Design nel campo specifico del progetto di strumenti per la riabilitazione è una tematica nuova che offre ampie potenzialità di intervento e nuovi sbocchi professionali per le future generazioni di designer. Attraverso una disamina delle esigenze espresse dai terapisti in relazione all'impiego di ausili e la descrizione di casi studio, si intende fornire al settore del Design linee guida e indicazioni progettuali specifiche per questo ambito di intervento supportate da conoscenze medicoscientifiche avanzate.

Esigenze emergenti nella medicina riabilitativa | In ambito medicale con il termine ausili si fa

riferimento a dispositivi tecnologici più o meno complessi che possono essere utilizzati sia per incrementare le possibilità funzionali del soggetto sia per adattare l'ambiente in cui vive. L'ausilio non è da considerarsi definitivo in quanto deve adattarsi alle esigenze del soggetto e all'evoluzione della disabilità, che può essere temporanea, permanente o progressiva.

Lo standard internazionale per la classificazione degli ausili tecnici per disabili è la norma ISO 9999:1998, successivamente revisionata nel 2002 e nel 2007. In quest'ultima versione, l'ausilio viene così definito: «[...] qualsiasi prodotto (inclusi dispositivi, apparecchiature, strumenti, sistemi tecnologici, software), di produzione specializzata o di comune commercio, atto a prevenire, compensare, tenere sotto controllo, alleviare o eliminare menomazioni, limitazioni nelle attività, o ostacoli alla partecipazione» (ISO 9999:2007). Questa definizione implementa le indicazioni dell'Organizzazione Mondiale della Sanità¹ in materia di disabilità che inducono all'adozione del modello bio-psico-sociale introdotto dall'International Classification of Functioning, Disability and Health, secondo cui il termine 'handicap' contenuto nella definizione nello standard del 1998 viene sostituito con i termini 'limitazioni nelle attività' e 'ostacoli alla partecipazione', mettendo in luce un diverso approccio alla disabilità e l'importanza che l'ausilio assume nel superamento delle condizioni di disabilità (Larcan, 2007).

È importante essere consapevoli che la prescrizione di un ausilio è solo la tappa conclusiva di un processo composto da più fasi nell'ambito di un progetto riabilitativo più ampio e personalizzato che prevede il coinvolgimento di molteplici figure professionali come medici, fisioterapisti, terapisti, logopedisti, tecnici ortopedici e psicologi, poiché nella maggioranza dei casi il problema dell'utente è multidimensionale e richiede un approccio globale centrato sulla persona (Langella, 2021). Non esistono corrispondenze univoche tra ausilio e patologia in quanto l'ausilio da adottare è frutto di una valutazione che coinvolge il soggetto nella sua totalità e che tiene conto dell'unicità della manifestazione patologica che deriva dalla peculiarità del soggetto. In queste valutazioni è fondamentale la conoscenza di ciò che il mercato specializzato offre, al fine di consentire al disabile la migliore qualità di vita (Larcan, 2007).

Accessibilità, ausili e assistenza personale costituiscono un trionfo inscindibile. Andrich (2011) sintetizza il complesso processo di progettazione di percorsi riabilitativi nell'equazione delle quattro 'a': ambiente accessibile + assistenza personale = autonomia. Per accessibilità si intende l'adattamento dell'ambiente e degli oggetti alle persone che ne fruiscono; l'assistenza personale è l'aiuto fisico da parte di altre persone nello svolgimento di determinate attività della vita quotidiana; il termine autonomia indica il recupero di un nuovo equilibrio, a fronte di una limitazione delle risorse fisiche e delle abilità del paziente, nelle relazioni con sé, con l'ambiente e con gli altri.

Per garantire che la soluzione riabilitativa delineata funzioni Ferrari (1996) propone, invece, tre principi centrati sul paziente che possono essere impiegati dai designer come linee guida nel progetto di ausili. Il primo principio è la competenza: la soluzione adottata deve consentire alla persona di svolgere l'azione in modo operativamente effi-



Figg. 1-3 | Modular Rollz Flex Walker in various configurations (credits: Rollz, 2016).

cace, con dispendio ottimale di energie fisiche e mentali; il secondo è la contestualità: la soluzione deve essere funzionale all'ambiente di utilizzo e da questo accettata; il terzo è la consonanza: la soluzione deve mettere a proprio agio l'utente rispettandone le scelte e la personalità. I fattori da considerare per consentire di individuare l'ausilio più adatto a un determinato soggetto sono dunque numerosi e complessi, per questo è necessario che questi artefatti abbiano caratteristiche modulari che consentano di adattarsi alla moltitudine di esigenze di pazienti e terapeuti.

Nel caso delle terapie riabilitative di tipo prevalentemente fisico il terapeuta deve spesso recarsi presso il domicilio del paziente, poiché quest'ultimo è impossibilitato a muoversi, portando con sé un set di strumenti che non sempre sono facilmente trasportabili. Talvolta viene impostato un trattamento personalizzato domiciliare in cui i pazienti possono svolgere esercizi autonomamente con un controllo periodico del terapeuta, in presenza o da remoto, per la verifica dell'esecuzione del programma settimanale (Dottorini, Paneroni and Mantovani, 2022). In questi casi gli ausili includono sempre più spesso tecnologie elettroniche e informatiche in un'ottica di tecnologia assistiva e telemedicina (Chiapponi, 2003; Voorheis et alii 2022). Alla luce di queste nuove frontiere terapeutiche la modularità assume un'accezione di integrazione tra componenti materiali e componenti tecnologici che richiede un'ulteriore sensibilità da parte dei designer nel facilitare le fasi di addestramento del paziente e del caregiver oltre che la loro accettazione.

Inoltre spesso le patologie hanno un impatto psicologico oltre che fisico per cui vengono coinvolti aspetti emozionali che nel progetto degli ausili non possono essere trascurati. Nelle riabilitazioni neuropsicologiche e logopediche le terapie mirano a facilitare l'autonomia in presenza di disturbo dell'attenzione ed esplorazione, della memoria, dell'apprendimento, della pianificazione e della comunicazione o di qualsiasi altra funzione neuropsicologica (Morris, 2013). Nell'ambito dei disturbi del linguaggio, in particolare, per soggetti con patologie che impediscono l'acquisizione linguistica o che sono temporaneamente o permanentemente impossibilitati a esprimersi verbalmente, possono essere utilizzati ausili ad alta o bassa tecnologia per vicariare la funzione perduta o non acquisita.

Tra gli strumenti ad alto contenuto tecnologico emergono quelli a tastiera, comunicatori con uscita in voce (VOCAs – Voice Output Communication Aids), applicazioni per dispositivi mobili e software per la comunicazione che richiedono un'attenta progettazione mirata ai requisiti di ergonomia, usabilità, affordance, in cui la modularità può rivelarsi molto utile (Corsi, Gagliardi and Gregori, 2020).

Design, modularità e modulabilità | Nel campo specifico degli ausili per la riabilitazione il Design può intervenire elaborando nuovi artefatti personalizzabili in funzione delle specifiche patologie e delle caratteristiche antropometriche dei pazienti allo scopo di ottenere una maggiore efficacia clinica dei trattamenti. L'approccio più idoneo a massimizzare il grado di adattabilità e flessibilità degli ausili è la modularità che permette di concepire kit costituiti da molteplici elementi assemblabili e intercambiabili che possono essere combinati in modo da adattarsi al variare delle tipologie di massaggio o esercizio riabilitativo indicate e dell'area anatomica interessata.

La modularità facilita la gestione e la manutenzione dei dispositivi terapeutici: con componenti separati, assemblabili e disassemblabili, dunque agevolmente sostituibili, è possibile semplificare i processi di manutenzione, pulizia e riparazione, riducendo tempi e costi associati. Inoltre, questo approccio offre un consistente vantaggio ambientale perché permette di sostituire diversi ausili con un unico kit modulare, riducendo la quantità di materia ed energia necessarie alla produzione (Pereño, 2023). Infine l'ottimizzazione e la riduzione dell'ingombro totale aumentano la trasportabilità che per i terapeuti è un requisito importante nelle visite a domicilio che sono spesso obbligate dalla difficoltà di spostarsi degli assistiti.

Attualmente esiste un forte divario di innovazione tra le tecniche di riabilitazione effettuate nei centri specialistici e quelle a domicilio. Le strumentazioni riabilitative hanno raggiunto livelli di evoluzione tecnologica molto avanzati, impiegando sensori, telecamere, dispositivi robotici, sistemi di realtà virtuale e aumentata: tecnologie molto costose che possono essere impiegate prevalentemente in strutture mediche, pubbliche o private. Generalmente nei centri di fisioterapia le richieste di trattamento sono numerosissime e quindi le sedute non possono essere molto ravvicinate, anche se le indicazioni terapeutiche lo richiederebbero.

Nei trattamenti domiciliari, in cui i terapeuti non hanno a disposizione la gamma di strumenti, ausili e apparecchiature presenti nei centri e negli ospedali, si preferisce proporre ai pazienti esercizi a cor-

po libero o massaggi manuali per evitare il trasporto di dispositivi ingombranti, pesanti e costosi. Molti operatori che svolgono attività domiciliari, quindi, producono i propri ausili in modo artigianale adattando oggetti di uso comune, in funzione delle loro esigenze, competenze e disponibilità economiche, come nel caso della 'terapia miofunzionale' in cui i logopedisti impiegano cannucce, fischiotti, bottoni, elastici ortodontici o abbassalingua per rispondere alle necessità del paziente.

La tendenza dei terapeuti ad autoprodurre i propri strumenti può determinare diversi problemi, tra cui la scarsa rispondenza dell'ausilio all'esercizio da compiere, l'inadeguatezza dei materiali impiegati (che non sono facilmente sterilizzabili, biocompatibili, certificabili e durevoli) e la ridotta replicabilità dei trattamenti e confrontabilità dei risultati. Ogni terapeuta utilizza strumenti diversi dai propri colleghi e ciò non consente una comparazione rigorosa tra i progressi compiuti dai diversi pazienti o tra i risultati ottenuti dai vari terapeuti. La ridotta comparabilità è un ostacolo alla condivisione scientifica e, dunque, all'avanzamento della conoscenza e della ricerca nel campo scientifico della medicina riabilitativa e delle tecniche terapeutiche. Inoltre spesso questi strumenti non sono studiati dal punto di vista esperienziale, per valutare il comfort, la compliance, l'ergonomia, la piacevolezza dell'esperienza e le emozioni del paziente.

L'approccio modulare, associato all'impiego di strumenti di modellazione computazionale e parametrica, favorisce lo sviluppo di kit di ausili assemblabili in modalità differenti, da distribuire in forma di files su piattaforme digitali, stampabili in 3D con materiali certificati per l'uso biomedicale, anche nei luoghi più remoti del mondo, offrendo la possibilità ai terapeuti di personalizzarli in funzione della tipologia di terapia e del paziente.

L'approccio legato alla combinazione tra modularità e tecnologie digitali facilita anche le verifiche di usabilità e di ergonomia (Bitkina, Kim and Park, 2020). La potenziale diffusione globale di un dispositivo diffuso in forma di file aperto, personalizzabile e stampabile in 3D, estende gli orizzonti di divulgazione della conoscenza e del benessere oltre che di confronto e scambio tra operatori del settore o tra pazienti, fino a creare comunità che lavorano sinergicamente condividendo approcci, esperienze e risultati terapeutici per il miglioramento della qualità della vita delle persone (Umair and Kim, 2015).

La normalizzazione e la comparabilità delle pratiche terapeutiche accelerano fortemente i processi di ricerca e di innovazione che diventano collettivi e condivisi, diversamente dalla condizione in cui ogni terapeuta percorre una strada autonoma e fondata sull'autoproduzione. Inoltre la modellazione e la stampa 3D offrono la possibilità di ottenere oggetti con morfologie complesse, generati direttamente in funzione delle caratteristiche anatomiche e biomeccaniche del corpo dei pazienti; si realizzano così strumenti ergonomici e progettati specificamente per il tipo di sollecitazione o di stimolazione richiesta, che facilitano e rendono più precisi i movimenti dei terapeuti e la valutazione delle risposte del paziente.

Questa dimensione apre la strada anche a nuove prospettive di auto-trattamento in cui il paziente assume un ruolo partecipativo, in base al quale, tra una terapia e l'altra può eseguire da solo alcuni degli esercizi, guidato dagli strumenti stessi che,

guidando e facilitando i movimenti, rendono il processo riabilitativo più rapido ed efficace (Vink and van Eijk, 2007).

Prodotti e sperimentazioni | La fase iniziale della ricerca è stata dedicata a una approfondita indagine sullo stato dell'arte internazionale, condotta con criterio selettivo che ha incluso prodotti commercializzati sviluppati nell'ultimo decennio nell'ambito della medicina riabilitativa e fisioterapica, caratterizzati dal contributo di designer e da un approccio modulare. Da questa indagine è emerso che i prodotti modulari e modulabili da impiegare nelle diverse forme di fisioterapia riabilitativa disponibili in commercio, che integrano conoscenze medico-scientifiche e Design per ottenere migliori qualità di comfort, compliance, aderenza o ergonomia, sono ancora poco diffusi.

Successivamente è stata condotta una ricognizione di progetti di ricerca, prototipi e concept sviluppati, per lo stesso ambito applicativo, in contesti accademici multidisciplinari che coinvolgono Fisioterapia e Design, in campo internazionale e nello stesso arco temporale (Aggogeri, Pellegrini and Adamini, 2016; Koren et alii, 2015; Wang et alii, 2022). I risultati di questa indagine lasciano intravedere un ampio orizzonte di opportunità di innovazione, in gran parte basate sulle tecnologie digitali, particolarmente promettente per le aziende specializzate e per i Centri di fisioterapia, che costituiscono un comparto produttivo sempre più rilevante. Tali opportunità, che verranno certamente colte dalle aziende consolidate più propense all'innovazione, potranno offrire un impulso anche alla nascita di nuove start-up impegnate nel trovare risposte alle complesse necessità del settore attraverso la sinergia tra ricerca scientifica, esperienza terapeutica, Design e nuove tecnologie digitali (Bellina and Jungmann, 2023).

Tra i prodotti in commercio che meglio rappresentano il concetto di versatilità modulare rientra il deambulatore a tre ruote Rollz Flex (Figg. 1-3) proposto dall'azienda californiana Rollz International, che può essere impiegato in diverse fasi del processo di riabilitazione di pazienti che devono recuperare le capacità motorie degli arti inferiori. Il deambulatore è costituito da un telaio strutturale in alluminio e da una serie di componenti modulari, tra cui ruote, sedili e manubri disponibili in diverse dimensioni e morfologie. I diversi elementi possono essere assemblati, disassemblati, sostituiti e combinati al telaio in assetti diversi per potersi adattare alle varie posture e capacità deambulatorie dei pazienti. Nel 2020 Rollz Flex ha vinto il premio Most Innovative Mobility Products Design Company proposto dalla rivista Global Health & Pharma Magazine nella categoria Healthcare and Pharmaceutical.

Sul sito dell'azienda sono riportate le opinioni degli utenti ed emerge che la modularità costituisce un grande vantaggio nell'ambito della riabilitazione motoria perché consente di adattare il dispositivo a diversi utenti e anche a diverse situazioni domestiche ed esterne, come nel caso della aggiunta della borsa, del vassoio, dell'ombrello o della lampada led, che consentono di integrare elementi che altrimenti andrebbero portati a parte impegnando le mani. I materiali e le morfologie impiegati garantiscono un buon bilanciamento tra peso, stabilità, sicurezza e comfort. L'unica criticità osservata è che i costi degli elementi base e degli

accessori sono abbastanza elevati per motivarne l'acquisto nell'ambito riabilitativo nel quale si prevede un uso prevalentemente temporaneo degli ausili, ma giustificati dall'elevata qualità dei materiali impiegati, necessari ad assicurare un alto standard prestazionale per l'intero sistema. Il set modulare potrebbe essere ulteriormente evoluto integrando componenti sensoristici e connettivi, per registrare e monitorare da remoto alcuni dati biometrici dell'utente e le modalità di utilizzo, così che medici e caregiver possano seguire i progressi dei pazienti anche a distanza.

Il dispositivo massaggiatore Novafon (Figg. 4-7), sviluppato e prodotto in Italia, impiega una soluzione tecnologica avanzata, definita a vibrazione locale, che può essere impiegata come trattamento e auto-trattamento in molti tipi di terapie di riabilitazione, sia fisiche sia neurologiche. La vibrazione è una forma di energia che può essere utilizzata per stimolare il sistema nervoso: quando il corpo viene esposto allo stimolo, il sistema nervoso periferico invia al cervello segnali che possono avere un effetto analgesico, antinfiammatorio e vasoattivo per alleviare i dolori muscolari, articolari e neuropatici e trattare i disturbi vascolari.

Novafon è composto da un'unità di controllo e da una serie di accessori, tra cui teste di vibrazione di dimensioni e forme differenti, che possono essere impiegate in funzione delle condizioni individuali del paziente per agire a diverse profondità e con diversi tipi di stimolazioni. Una delle più importanti specificità della tecnologia è che la vibrazione raggiunge una maggiore profondità d'azione sui tessuti rispetto ad altri dispositivi che stimolano solo in superficie.

Poiché Novafon è uno strumento molto versatile che permette il trattamento di diverse terapie per diversi disturbi e patologie, richiede una formazione adeguata da parte dei terapeuti, per as-

sicurare la sicurezza oltre che l'efficacia del trattamento. La multifunzionalità, che consente un uso multiplo per diversi pazienti, impone inoltre una frequente manutenzione per garantire il corretto funzionamento del prodotto nel tempo e una facilità di igienizzazione. L'azienda prevede un semplice kit di pulizia e disinfezione, che potrebbe essere implementato da componenti monouso in materiali degradabili o da strumenti di sterilizzazione più efficaci e biocompatibili, soprattutto per le testine impiegate nella terapia logopedica che vengono a contatto con la cavità orale.

Nonostante questo prodotto sia basato su studi e test scientifici e su una lunga storia evolutiva partita nel 1928 con gli studi sull'effetto delle onde corte e delle onde sonore sul corpo è necessario attendere che la tecnologia dell'ultima versione di Novafon, sviluppata nel 2020, sia più matura per poter disporre di dati statisticamente significativi che possano supportare i terapeuti nella definizione di terapie puntuali e personalizzate che valorizzino la modularità del sistema.

La collaborazione sinergica tra designer e logopedisti ha prodotto il kit G-stories², uno strumento multifunzionale e modulare sviluppato per facilitare la logopedia nel trattamento di disprassie oro-bocca-facciali nei bambini (Figg. 8-10). Il set è composto da uno specchio riflettente e semitrasparente attraverso cui il logopedista osserva il paziente e, raccontando delle storie, mima i movimenti facciali richiesti dal tipo di terapia che il bambino deve imitare per svolgere gli esercizi. L'impiego dello specchio consente al paziente di intravedere, grazie alla semitrasparenza, l'esercizio svolto dal logopedista e di imitarlo controllandone l'aderenza attraverso la visione della propria immagine nello specchio, in sovrapposizione a quella del terapista. Le carte illustrate e le maschere intercambiabili per caratterizzare lo specchio raf-



Figg. 4-7 | Novafon Vibrating Massager for Therapeutic Massages (credits: Novafon, 2020).

figurano soggetti, luoghi e oggetti che coadiuvano il racconto e rafforzano l'identificazione e la componente empatica (Iacoboni, 2009), facilitando l'apprendimento degli esercizi, la partecipazione e la collaborazione.

Il progetto G-stories è ancora in fase prototipale e richiede ulteriori test sugli utenti per essere ottimizzato, industrializzato e commercializzato. Nella fase di ingegnerizzazione sarà necessario scomporre ulteriormente l'elemento che sorregge lo specchio in modo da semplificare il processo produttivo e da renderlo più facilmente disassemblabile, assemblabile e trasportabile. Il set potrebbe essere, inoltre, integrato con luci led collocate sulle due facce del supporto in modo da poter illuminare i volti del bambino e del terapista eviden-



Figg. 8-10 | G-stories, Modular Speech Therapy Set for Orofacial Dyspraxia Treatment (credits: S. Carleo, 2021).

ziando le espressioni del viso. Il gioco di carte potrebbe anche essere integrato con componenti audio che consentano di riprodurre specifici suoni, difficilmente producibili con la voce, in modo da rendere più immersivo il racconto e di registrarle per offrire la possibilità di riascoltare le sedute e valutarne i progressi.

Nel progetto di ricerca e sperimentazione Sensitize / Reactivate³, svolto da un gruppo multidisciplinare costituito da designer ed esperti di riabilitazione neurocognitiva, è stato affrontato il tema della paralisi di Bell, che colpisce il nervo facciale causando l'immobilizzazione di una parte del volto, con conseguenti problemi di espressione facciale, masticazione, deglutizione e udito (Kaur, 2018). Il confronto con i terapisti ha portato a identificare due diversi tipi di terapia basati su principi e metodiche diversi e quindi a produrre due specifici kit modulari.

Sensitize (Figg. 11-13) è un kit di sussidi, sviluppato secondo il metodo riabilitativo ECT, che richiede al paziente di riconoscere e definire specifiche stimolazioni tattili al fine di recuperare percezione, sensibilità e capacità di movimento. Il kit è compatto e trasportabile ed è composto da cinque diversi set di sussidi che stimolano, mediante texture, forme e materiali diversi, le zone del volto colpite dalla patologia; accessori e moduli principali sono realizzati con la stampa 3D in modo da poter essere condivisi da molteplici terapisti e contesti medicali. Il secondo kit, Reactivate, si basa sul metodo Kabat, che stimola specificamente i muscoli e le articolazioni del volto allo scopo di riattivare le connessioni e le capacità motorie (Figg. 14, 15). Composto da un unico manico e da cinque testine intercambiabili con diverse forme e texture che possono essere utilizzate per replicare puntualmente le manovre manuali del terapista, il kit è stato sviluppato per consentire anche routine di auto-trattamento secondo specifiche prescrizioni mediche e previa sessione di formazione da parte del terapista. Entrambe le soluzioni includono una piattaforma digitale per la customizzazione del prodotto in funzione delle esigenze di centri terapeutici e fisioterapisti.

Anche i progetti Sensitize e Reactivate, come il caso studio precedente, sono frutto di ricerche accademiche e richiedono un ulteriore processo di ingegnerizzazione e validazione, mirato soprattutto a renderli economicamente più accessibili.

Conclusioni | La collaborazione tra Design e Medicina riabilitativa sta determinando un cambiamento di paradigma nell'approccio alle terapie fisiatriche. Gli ausili, gli strumenti e i kit progettati da designer possono ridefinire il panorama della riabilitazione introducendo soluzioni modulari, personalizzabili, adattabili e confortevoli che migliorano la qualità dell'esperienza sia dei pazienti sia dei terapisti. Con l'evoluzione di questa collaborazione, il potenziale per ottimizzare ulteriormente i risultati e le esperienze di riabilitazione è molto promettente. Dai casi studio analizzati emerge chiaramente che l'approccio modulare nel design medicale e, in particolare in ambito riabilitativo, offre vantaggi significativi in quanto la personalizzazione dei dispositivi consente di adattarli alle specifiche esigenze dei pazienti, migliorando i risultati clinici. L'uso di kit condivisi e open source, inoltre, facilita la condivisione di conoscenze, tecnologie e buone pratiche tra i professionisti sanitari, pro-

muovendo una cultura di collaborazione e apprendimento continuo che può contribuire a migliorare l'efficacia delle cure e a promuovere l'innovazione nel campo medico.

Dall'analisi dello stato dell'arte e dei casi studio descritti emergono alcune specifiche indicazioni rivolte ai designer: prima di tutto è importante che, per affrontare la complessità del progetto medicale rivolto all'ambito fisiatrico, i designer si dotino di conoscenze scientifiche di base relative ad anatomia, ergonomia, neuroscienze e ortopedia che consentano loro di interagire e collaborare con i medici e di leggere articoli scientifici specialistici utili a supportare i loro progetti con una base scientifica adeguata. Non è semplice superare le barriere linguistiche e di competenze che sussistono tra discipline progettuali e medico-scientifiche.

Nel progettare i singoli strumenti e accessori è necessario conoscere a fondo le metodiche impiegate dai terapisti, i movimenti effettuati, le criticità emergenti e le esigenze specifiche, considerando al contempo i pazienti e gli operatori come utenti direttamente coinvolti. Per raccogliere queste informazioni è utile dedicare sessioni di osservazione e di ascolto degli utenti sul campo specifico di azione, impiegando i metodi quantitativi e qualitativi di ricerca sugli utenti del Design Thinking come sondaggi, interviste, partecipazione alle terapie con raccolta di materiale audio e video-fotografico, immersione nei ruoli, collage, card sorting.

I valori del design incentrato sull'uomo sono alla base di ognuno di questi approcci che richiedono un'attitudine del designer a guardare, ascoltare, fare domande e raccogliere informazioni; l'osservazione, l'ascolto e il domandare richiedono pazienza, attenzione e umiltà, mentre le interviste agli utenti creano empatia e rivelano intuizioni: è fondamentale dunque, che i designer, oltre alle competenze tecniche e professionali richieste da questo ambito siano anche dotati di capacità relazionali che si rivelano vitali quando si agisce in un settore così delicato. L'organizzazione di workshop e sessioni di co-design con utenti volontari facilitano la fase di ricerca sugli utenti rendendola più rapida, oltre che più fluida e naturale, perché offrono l'opportunità di interagire con soggetti propensi e interessati alla sperimentazione.

Per applicare la strategia di modularità nella maniera più efficace possibile i designer devono riuscire a scomporre i compiti, le azioni e i gesti previsti da ogni singolo esercizio fisioterapico individuando i requisiti prestazionali richiesti dai singoli compiti e le variabili relative alla differenziazione delle specifiche caratteristiche anatomiche e patologiche dei pazienti. Successivamente è utile accorpate compiti, azioni e gesti con requisiti simili per concepire moduli base comuni sui quali montare gli accessori specializzanti che consentono di adeguarli alle specificità dei pazienti.

La definizione di materiali, morfologie e tecnologie di produzione deve essere correlata alle esigenze primarie di economicità, biocompatibilità, facile assemblabilità e disassemblabilità e sostenibilità ambientale, mentre la valutazione dell'impatto ambientale del ciclo di vita dei kit terapeutici modulari deve tenere conto dei vantaggi ottenuti dalla multi-funzionalità di alcuni elementi e dalla aggiornabilità, entrambe importanti strategie di riduzione di materia ed energia e, dunque, di impatto ambientale dei prodotti. La modularità, per quanto apporti molteplici benefici, aumenta anche

la complessità d'uso dei dispositivi, aspetto questo di cui tenere conto nella fase progettuale in cui si deve mirare alla massima semplificazione e facilitazione delle operazioni per tutti gli utenti.

Tra gli sviluppi futuri emerge l'esigenza di predisporre degli specifici percorsi formativi nell'ambito della formazione universitaria dei designer per garantire figure professionali adeguate che possano innestarsi nel settore affiancando alle aziende specializzate quelle già presenti con specializzazioni in bioingegneria, medicina riabilitativa e ingegneria dei materiali. Un importante aspetto che emerge dallo scenario descritto riguarda la necessità di conoscere le certificazioni necessarie, in particolare rispetto a materiali e tecnologie impiegate nella nuova frontiera degli ausili stampati in 3D: ogni innovazione in ambito medicale deve integrarsi con i protocolli clinici esistenti che vengono aggiornati poco frequentemente. Inoltre l'implementazione di tecnologie sensoristiche e di connettività che permettano il monitoraggio e la registrazione dei dati relativi alle terapie offre la possibilità di migliorare l'efficacia dei dispositivi; è utile quindi predisporre tra i moduli specifici componenti assemblabili e aggiornabili delegati a questo tipo di funzionalità.

In recent decades, and particularly after the Covid-19 pandemic, synergies between Medicine and Design and have become increasingly common and fruitful (Bisson et alii, 2019; Lewiss and Lupton, 2021; Shadlyn et alii, 2022; Bracco et alii, 2022), especially in the design of biomedical products, which are among the most technologically advanced and rapidly evolving sectors (Mishra and Sandhu, 2021; Fries, 2021). Since medical devices come into direct contact with patients, studying their compatibility with users' anthropometric and psychophysical characteristics is essential to ensure treatment effectiveness and safety. The contribution of Design is, therefore, crucial and strategic in the innovation processes of medical tools and their adaptation to changing lifestyles, care practices, and scientific research advancements (Privitera, Design and Johnson, 2009).

In these processes, designers can refer to design methods such as Human-centred Design (Giacomin, 2014; Melles, Albayrak and Goossens, 2021) and Design Thinking (Ku and Lupton, 2022; Lockwood, 2014). Being aware of the users' needs and the psycho-physical impact of biomedical products on them allows for developing innovative design solutions characterised by high levels of comfort, compliance, adherence, and ergonomics, which enhance patient engagement and therapist performance (Langella and Pontillo, 2023).

Engagement can be interpreted as a gradual connection process between the healthcare provider and the user. The comfort of an aid used in physiotherapeutic treatments depends on how comfortable, easy, and pleasant it is to use, from both the patient's and the operator's perspectives. Compliance refers to the patient's willingness to accept the treatment recommended according to the prescription. In psychology, compliance refers to a favourable response without resistance to a recommendation. Compliance and comfort are factors that influence the patient's adherence to the treatment and adherence to the

prescribed timing. Therapeutic adherence is understood as the active and collaborative involvement of the patient in planning and implementing the therapy, which is proposed as an agreement between consenting parties.

Ergonomics, finally, is particularly important in this context because it includes the ability to bring health, safety, and comfort benefits to users. The safety of a therapeutic treatment requires that the treatment does not result in disadvantages outweighing the advantages obtained (Bright et alii, 2015). Developing this new area of action within project culture requires designers to become familiar with these principles and their implications for the project. They should also be inclined to collaborate synergistically with doctors, therapists, patient associations, and manufacturing companies.

All of this requires the definition of suitable methodological approaches to address the complexity and multidisciplinary inherent in the medical field (Chiapponi, 1999; Giambattista, 2019; Langella, 2021). In particular, within the fields of neurological, orthopaedic, and phoniatic rehabilitative medicine, the contribution of Design can be highly beneficial in terms of therapeutic effectiveness and user well-being (Johnson, Das and Tyler, 2021). Rehabilitative medicine, also known as physiatry, is the branch of medical science that deals with the prevention, diagnosis, therapy, and rehabilitation in conditions of congenital or acquired pathology or disability. Specialists and therapists working in this field aim to help individuals regain independence and improve their quality of daily life concerning a disability, injury, illness, or surgical intervention.

The contribution of Design primarily concerns the design of aids, tools, and accessories that assist in performing therapeutic exercises in the three main areas: neurological rehabilitation, which deals with patients with neurological disabilities such as those caused by strokes, spinal cord injuries, multiple sclerosis, Parkinson's disease, and other neurological conditions; orthopaedic rehabilitation, which focuses on patients with orthopaedic issues, such as bone fractures, ligament injuries, joint problems, and orthopaedic surgeries; and phoniatic rehabilitation, which focuses on communicative and swallowing disabilities. In the various types of therapy identified, the designer can act as a facilitator of innovation processes in situations where unresolved needs arise.

Advancements in the medical sciences in the field of rehabilitation are progressing at a significantly faster pace than the evolution of tools, which often struggle to keep up with the knowledge and methodologies. These tools can be cumbersome, poorly ergonomic, and difficult to adapt to the varying characteristics of users and therapies. Few companies produce rehabilitation devices and are often not inclined toward innovative design. Portable tools, in particular, are not designed to address users' and practitioners' diverse and complex needs. For these reasons, therapists often self-produce their aids, adapting and assembling materials and objects from other areas to meet their therapeutic needs.

In light of the aforementioned considerations and to overcome the mentioned challenges, this article promotes a modular approach as a possible design strategy to achieve more ergonomic, usable, adaptable, flexible, and sustainable reha-

ilitation aids. The contribution seeks to address a gap in attention regarding these topics in the international scientific literature related to medical design, which has primarily focused on designing biomedical equipment, wearable devices for monitoring biometric values, prosthetics, and personal protective aids.

Integrating Design into the specific field of rehabilitation tool design is a novel area that offers ample potential for intervention and new professional opportunities for future generations of designers. Through an examination of the needs expressed by therapists in relation to the use of aids and the description of case studies, the intent is to provide the Design sector with specific guidelines and design recommendations for this field of intervention, supported by advanced medical and scientific knowledge.

Emerging needs in rehabilitative medicine | In the medical field, the term 'aids' refers to more or less complex technological devices that can be used to enhance individuals' functional capabilities and adapt their living environment. Aids should not be considered as final solutions because they need to adapt to the individual's needs and the progression of the disability, which can be temporary, permanent, or progressive.

The international standard for classifying technical aids for people with disabilities is ISO 9999:1998, later revised in 2002 and 2007. In the latest version, an aid is defined as any product (including devices, equipment, tools, technological systems, and software), whether designed for persons with disabilities or general use, that is intended to prevent, compensate, monitor, alleviate, or neutralise impairments, activity limitations, or participation restrictions (ISO 9999:2007). This definition aligns with the World Health Organization's¹ guidelines on disability, which advocate for adopting the biopsychosocial model introduced by the International Classification of Functioning, Disability and Health. In this model, the term 'handicap' used in the 1998 standard's definition is replaced with the terms 'activity limitations' and 'participation restrictions', highlighting a different approach to disability and the significance of aids in overcoming disability conditions (Larcan, 2007).

It is important to be aware that prescribing an aid is only the final stage of a multi-phase process within a broader and personalised rehabilitation project that includes various phases. The involvement of multiple professional figures such as doctors, physiotherapists, therapists, speech therapists, orthopaedic technicians, and psychologists is crucial: in the majority of cases, the user's problem is multidimensional and requires a comprehensive, person-centred approach (Langella, 2021). There are no straightforward correspondences between aids and specific pathologies, as the selection of an aid results from an evaluation that considers the individual as a whole and the uniqueness of the pathological manifestation resulting from the individual's specific characteristics. In these assessments, knowledge of what the specialised market offers is fundamental to enabling people with disabilities to achieve the best quality of life (Larcan, 2007).

Accessibility, aids, and personal assistance are an inseparable trio. Andrich (2011) synthesises the complex process of designing rehabilitation



Figg. 11-13 | Sensitize, Bell's Palsy Treatment Kit based on the ETC Method (credits: L. Piccin, 2017).

pathways into the equation of the four 'a's: accessible environment + personal assistance = autonomy. Accessibility refers to adapting the environment and objects to the people who use them; personal assistance involves physical help from others in performing specific activities of daily life; and autonomy represents the regaining of a new equilibrium in the face of physical limitations and the patient's abilities, enabling them to interact with themselves, their environment, and others.

Ferrari (1996) suggests three patient-centred principles that designers can use as guidelines in aid design to ensure that the outlined rehabilitation solution functions. The first principle is competence, where the adopted solution should enable the person to perform the action effectively, with an optimal expenditure of physical and mental energy. The second principle is contextuality, ensuring that the solution is functional within the user's environment and accepted by it. The third principle is consonance, meaning the solution should make users feel comfortable by respecting their choices and personality. Considering the numerous and complex factors that need to be taken into account to identify the most suitable aid for a specific individual, it's essential for these artefacts to have modifiable features that allow them to

adapt to the multitude of needs of both patients and therapists. In cases of primarily physical rehabilitation therapies, therapists often need to visit patients at their homes because the patients are unable to move, and they bring with them a set of tools that are not always easily transportable. Sometimes, personalised home-based treatments are established, allowing patients to perform exercises independently with periodic checks by the therapist, either in person or remotely, to verify the execution of the weekly program (Dottorini, Paneroni and Mantovani, 2022). In these cases, aids increasingly incorporate electronic and computer technologies focusing on assistive technology and telemedicine (Chiapponi, 2003; Voorheis et alii, 2022). Given these new frontiers in therapy, modularity takes on a meaning of integration between material and technological components, which requires designers to be more sensitive to facilitating patient and caregiver training phases as well as their acceptance.

Moreover, diseases often have a psychological and physical impact, so emotional aspects must be considered in aid design. In neuropsychological and speech therapy rehabilitation, therapies aim to promote autonomy in the presence of attention and exploration disorders, memory problems, learning difficulties, planning and communication, or any other neuropsychological function (Morris, 2013). Specifically, for language disorders, for individuals with conditions that hinder language acquisition, or for those temporarily or permanently unable to express themselves verbally, high or low-tech aids can be used to compensate for the lost or undeveloped function. High-tech tools include keyboards, voice output communication aids (VOCAs), mobile device applications, and communication software, all of which require careful design focused on ergonomics, usability, and affordance, where modularity can prove to be very useful (Corsi, Gagliardi and Gregori, 2020).

Design, modularity and modularity | In the specific field of rehabilitation aids, Design can play a role in developing new customisable artefacts tailored to particular medical conditions and the anthropometric characteristics of patients to achieve greater clinical effectiveness in treatments. The most suitable approach to maximise the adaptability and flexibility of aids is modularity, which allows for creating kits composed of multiple assembleable and interchangeable elements that can be combined to adapt to different types of massages or rehabilitative exercises as indicated and the targeted anatomical area.

Modularity simplifies the management and maintenance of therapeutic devices: with separate components that can be assembled and disassembled and, therefore, easily replaceable, it is possible to streamline maintenance, cleaning, and repair processes, reducing associated time and costs. Furthermore, this approach offers a significant environmental advantage because it allows for the replacement of various aids with a single modular kit, reducing the amount of materials and energy required for production (Pereno, 2023). Finally, optimisation and the reduction of overall size increase portability, which is an important requirement for therapists during home visits, which are often necessitated by the mobility challenges faced by the patients.

Currently, there is a significant innovation gap between rehabilitation techniques performed in specialised centres and those used at home. Rehabilitation equipment has reached highly advanced technological levels, incorporating sensors, cameras, robotic devices, and virtual and augmented reality systems – technologies that are quite expensive and are primarily used in medical facilities, whether public or private. In general, in physical therapy centres, the demand for treatment is relatively high, which means that therapy sessions cannot be scheduled very closely together, even when the therapeutic guidelines necessitate it.

In home-based treatments, where therapists don't have access to the range of tools, aids, and equipment available in clinics and hospitals, offering patients bodyweight exercises or manual massages is preferable to avoid transporting bulky, heavy, and costly devices. Therefore, many practitioners who provide home-based care craft their own aids by adapting common objects according to their needs, skills, and financial resources. In the case of 'myofunctional therapy', for example, speech therapists use straws, whistles, buttons, orthodontic elastics, or tongue depressors to address the patient's needs.

The tendency of therapists to self-produce their own tools can lead to various issues, including a lack of suitability of the aids for the specific exercises to be performed, the inadequacy of the materials used (which are not easily sterilisable, biocompatible, certifiable, and durable), and the limited replicability of treatments and comparability of results. Each therapist tends to use different tools from their colleagues, which does not allow for a rigorous comparison of the progress made by different patients or the results achieved by various therapists. Reduced comparability is an obstacle to scientific sharing and, therefore, advancing knowledge and research in rehabilitative medicine and therapeutic techniques. Furthermore, these tools are often not evaluated from an experiential standpoint, considering factors like comfort, compliance, ergonomics, the pleasantness of the experience, and the patient's emotions.

The modular approach, combined with the use of computational and parametric modelling tools, facilitates the development of kits of aids that can be assembled in different ways. These kits can be distributed in digital files, 3D printable with materials certified for biomedical use, even in the most remote parts of the world. This approach allows therapists to customise aids based on the type of therapy and the patient's needs. Combining modularity and digital technologies also simplifies usability and ergonomics testing (Bitkina, Kim and Park, 2020). The potential global dissemination of a device provided as an open, customisable, 3D-printable file extends the horizons of knowledge sharing and well-being, as well as collaboration and exchange among professionals in the field or among patients. It leads to creating communities that work synergistically, sharing approaches, experiences, and therapeutic outcomes to enhance the quality of people's lives (Umair and Kim, 2015).

The normalisation and comparability of therapeutic practices greatly accelerate the research and innovation processes, making them collective and shared, unlike the condition where each therapist follows an independent path based on self-

production. Furthermore, 3D modelling and printing offer the possibility of creating objects with complex morphologies generated directly based on the anatomical and biomechanical characteristics of the patient's body. This results in ergonomic tools designed specifically for the type of stress or stimulation required, facilitating and making therapists' movements and patient responses more precise. This dimension also opens the door to new perspectives on self-treatment, in which the patient participates. Between two therapy sessions, the patient can perform some exercises independently, guided by the tools themselves. These tools guide and facilitate movements, making the rehabilitation faster and more effective (Vink and van Eijk, 2007).

Products and experimentations | The initial phase of the research was dedicated to an in-depth investigation of the international state of the art, conducted selectively, including commercially available products developed in the last decade in the field of rehabilitative medicine and physiotherapy, characterised by the involvement of designers and a modular approach. From this investigation, it emerged that modular and customisable products for use in various forms of rehabilitative physiotherapy available in the market, which integrate medical and scientific knowledge with design principles to achieve better levels of comfort, compliance, adherence, and ergonomics, are still not widely prevalent. Subsequently, a survey of research projects, prototypes, and concepts developed for the same application domain was conducted in multidisciplinary academic contexts involving Physiatry and Design on an international scale and within the same timeframe (Aggogeri, Pellegrini and Adami, 2016; Koren et alii, 2015; Wang et alii, 2022).

The investigation results suggest a broad horizon of innovation opportunities, largely based on digital technologies, which hold particular promise for specialised companies and physiotherapy centres, constituting an increasingly relevant produc-

tion sector. These opportunities, likely to be seized by forward-thinking established companies, could also spur the emergence of new start-ups dedicated to addressing the sector's complex needs through the synergy of scientific research, therapeutic experience, design, and new digital technologies (Bellina and Jungmann, 2023).

One of the commercially available products that best represents the concept of modular versatility is the three-wheeled walker, Rollz Flex, offered by the California-based company Rollz International (Fig. 1-3). It can be used in various stages of the rehabilitation process for patients needing to recover lower limb motor capabilities. The walker consists of an aluminium structural frame and various modular components, including wheels, seats, and handles available in multiple sizes and configurations. These different elements can be assembled, disassembled, replaced, and combined with the frame in different setups to adapt to patients' various postures and ambulatory abilities. In 2020, Rollz Flex received the Most Innovative Mobility Products Design Company award from Global Health & Pharma Magazine in the Healthcare and Pharmaceutical category.

User opinions on the company's website highlight that modularity is a significant advantage in motor rehabilitation because it allows the device to be adapted to different users and various domestic and outdoor situations. This includes the addition of accessories such as bags, trays, umbrellas, or LED lamps, which integrate elements that would otherwise need to be carried separately, thus freeing up the hands. The materials and configurations used to balance weight, stability, safety, and comfort well. The only drawback observed is that the base elements and accessories costs are relatively high, which may discourage their purchase, especially in rehabilitation scenarios where aids are used temporarily. However, these costs are justified by the high quality of the materials used, necessary to ensure a high stan-

dard of performance for the entire system. The modular set could be further developed by integrating sensory and connectivity components to remotely record and monitor some of the user's biometric data and usage patterns. This would enable doctors and caregivers to track their patients' progress from a distance.

The Novafon massager device (Fig. 4-7), developed and produced in Italy, employs an advanced technological solution called local vibration. It can be used for both treatment and self-treatment in various types of rehabilitation therapies, both physical and neurological. Vibration is a form of energy that can stimulate the nervous system. When the body is exposed to this stimulus, the peripheral nervous system sends signals to the brain that can have analgesic, anti-inflammatory, and vasoactive effects, alleviating muscle, joint, and neuropathic pain, as well as treating vascular disorders.

Novafon consists of a control unit and a range of accessories, including vibration heads of different sizes and shapes that can be used based on individual patient conditions to act at different depths and with various types of stimulation. One of the most significant features of this technology is that it can reach deeper into the tissues compared to other devices that only stimulate the surface.

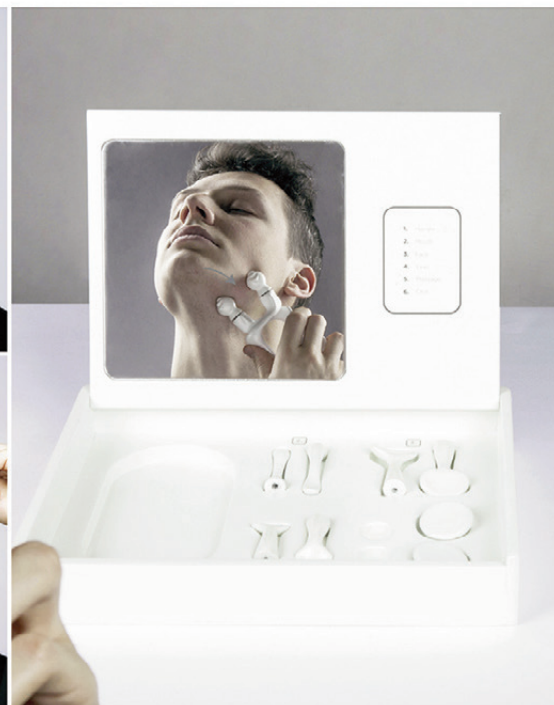
Since Novafon is a highly versatile tool that allows treatment for various disorders and conditions, it requires proper training for therapists to ensure both safety and treatment effectiveness. Its multifunctionality, which enables use with multiple patients, also demands regular maintenance to ensure the product's long-term functionality and ease of hygiene. The company provides a basic cleaning and disinfection kit, which could be enhanced with disposable components made from biodegradable materials or more effective and biocompatible sterilisation tools, especially for the vibration heads used in speech therapy that come into contact with the oral cavity.



Stimolazione muscolo buccinatore

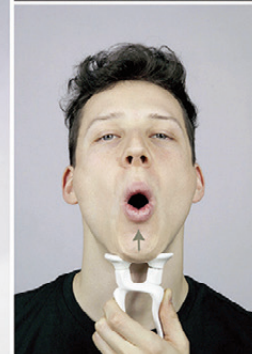


Stimolazione muscolo dell'occhio



Tecniche di automassaggio

Stimolazione muscolo frontale



Stimolazione muscoli collo e mento

Fig. 14, 15 | Reactivate, Bell's Palsy Treatment Kit based on the Kabat Method (credits: L. Piccin, 2017).

Despite this product being based on scientific studies and tests, with a long evolutionary history dating back to 1928, investigating the effects of short waves and sound waves on the body, it is necessary to wait for the latest version of Novafon, developed in 2020, to mature further to have statistically significant data that can support therapists in defining precise and personalised therapies that capitalise on the system's modularity.

The collaborative synergy between designers and speech therapists has led to the development of the G-stories² kit, a multifunctional and modular tool designed to facilitate speech therapy for orofacial apraxia in children (Fig. 8-10). The set includes a reflective and semi-transparent mirror through which the speech therapist observes the patient. While narrating stories, the therapist mimics the facial movements required for the type of therapy the child needs to imitate to perform the exercises. The use of the mirror allows the patient to catch a glimpse, thanks to its semi-transparency, of the exercise performed by the therapist and to imitate it while monitoring their adherence by viewing their own image in the mirror, superimposed on that of the therapist. The illustrated cards and interchangeable masks that characterise the mirror depict subjects, places, and objects that assist in the storytelling and reinforce identification and the empathic component (Iacoboni, 2009), facilitating the learning of exercises, participation, and collaboration.

The G-stories project is still in the prototype phase and requires further user testing for optimisation, industrialisation, and commercialisation. In the engineering phase, it will be necessary to break down further the frame element supporting the mirror to simplify the production process and make it easier to disassemble, assemble, and transport. The set could also be integrated with LED lights placed on both sides of the frame to illuminate the faces of the child and therapist, highlighting facial expressions. The card game could also be enhanced with audio components that allow the playback of specific sounds that are difficult to produce with the voice, making the storytelling more immersive and recording voices to provide the opportunity to review sessions and assess progress.

In the Sensitize / Reactivate³ research and experimentation project, carried out by a multidisciplinary team of designers and neurocognitive rehabilitation experts, the topic of Bell's palsy was addressed. Bell's palsy affects the facial nerve, leading to the immobilisation of a part of the face and resulting in problems related to facial expression, chewing, swallowing, and hearing (Kaur, 2018). Collaboration with therapists has led to the identification of two different types of therapy based on different principles and methodologies, ultimately producing two specific modular kits.

Sensitize (Fig. 11-13) is an aid kit developed following the ECT rehabilitation method, which requires the patient to recognise and define specific tactile stimuli to recover perception, sensitivity, and movement capabilities. The kit is compact and portable, consisting of five different sets of aids that stimulate the areas of the face affected by the condition using different textures, shapes, and materials. Accessories and main modules are created using 3D printing, allowing them to be shared among multiple therapists and medical settings.

The second kit, Reactivate, is based on the Kabat method, which specifically stimulates the muscles and joints of the face to reactivate connections and motor capabilities (Fig. 14, 15). This kit comprises a single handle and five interchangeable heads with various shapes and textures that can be used precisely to replicate the manual manoeuvres performed by a therapist. It was developed to allow self-treatment routines based on specific medical prescriptions and following prior training by the therapist. Both solutions include a digital platform for product customisation to meet the needs of therapeutic centres and physiotherapists. Like the previous case study, the Sensitize and Reactivate projects result from academic research and require further engineering and validation, primarily aimed at making them more economically accessible.

Conclusions | The collaboration between design and rehabilitative medicine is causing a paradigm shift in the approach to physiotherapeutic treatments. Aids, tools, and kits designed by designers can redefine the landscape of rehabilitation by introducing modular, customisable, adaptable, and comfortable solutions that enhance the quality of the experience for both patients and therapists. As this collaboration evolves, the potential to further optimise rehabilitation outcomes and experiences is highly promising.

The case studies demonstrate that the modular approach in medical design, particularly rehabilitation, offers significant advantages. Device customisation allows them to be tailored to the specific needs of patients, thereby improving clinical results. Moreover, the use of shared and open-source kits facilitates the sharing of knowledge, technologies, and best practices among healthcare professionals, promoting a culture of collaboration and continuous learning. This can contribute to improving the effectiveness of treatments and promoting innovation in the medical field.

From the analysis of the state of the art and the described case studies, specific recommendations are directed at designers. Firstly, it is essential for designers, in order to address the complexity of medical projects in the field of physiotherapy, to acquire a basic scientific knowledge of anatomy, ergonomics, neuroscience, and orthopaedics. This knowledge will enable them to interact and collaborate with medical professionals and to read specialised scientific articles that support their projects with a solid scientific foundation. Overcoming the language and competency barriers between design and medical-scientific disciplines is complex.

When designing individual tools and accessories, it is essential to have an in-depth understanding of the techniques used by therapists, the movements involved, the emerging challenges, and the specific needs. This must be done while considering the patients and practitioners as directly involved users. To gather this information, it is helpful to dedicate observation and user listening sessions in the specific field of action, using both quantitative and qualitative user research methods from Design Thinking, such as surveys, interviews, participation in therapies with audio and video documentation, role immersion, collages, and card sorting. Human-centred design values underlie these approaches, which require a de-

signer's attitude to observe, listen, ask questions, and gather information. Observation, listening, and questioning demand patience, attention, and humility. User interviews create empathy and reveal insights. Therefore, it is crucial that designers, in addition to the technical and professional skills required in this field, possess vital relational skills when working in such a sensitive sector. Organising workshops and co-design sessions with volunteer users can facilitate the user research phase, making it faster, more fluid, and natural because it provides an opportunity to interact with individuals who are willing and interested in experimentation.

To apply the modularity strategy most effectively, designers must be able to break down the tasks, actions, and gestures involved in each physiotherapy exercise, identifying the performance requirements for each task and the variables related to the differentiation of specific anatomical and pathological characteristics of patients. Subsequently, it is helpful to group tasks, actions, and gestures with similar requirements to create common basic modules on which specialised accessories can be mounted to adapt them to the specific needs of patients.

The definition of materials, morphologies, and production technologies must be linked to primary requirements of cost-effectiveness, biocompatibility, ease of assembly and disassembly, and environmental sustainability. The evaluation of the environmental impact of the life cycle of modular therapeutic kits should consider the benefits of multifunctionality of certain elements and their upgradeability, both of which are important strategies for reducing material and energy consumption and, therefore, the environmental impact of products. Modularity, while bringing multiple benefits, also increases the complexity of device use. This aspect should be considered during the design phase, aiming for maximum simplification and ease of operation for all users.

Among future developments, there is a need to establish specific educational pathways within the university training of designers to ensure the availability of suitable professional figures that can work in the sector alongside existing professional roles in specialised companies, such as biomedical engineering, rehabilitative medicine, and materials engineering. An important aspect of the described scenario is the need to understand the necessary certifications, especially regarding materials and technologies used in the new frontier of 3D-printed aids. Every innovation in the medical field must integrate with existing clinical protocols, which are updated infrequently. Furthermore, the implementation of sensor technologies and connectivity for monitoring and recording therapy-related data offers the possibility to improve the effectiveness of these devices. Therefore, including specific modules with components that can be assembled and upgraded for this functionality is useful.

Acknowledgements

The contribution is the result of a joint reflection by the authors. However, the introductory paragraph and ‘Design, modularity and modularity’ can be attributed to C. Langella, ‘Emerging needs in rehabilitative medicine’ to M. De Luca and C. Langella, and ‘Products and experimentations’ and ‘Conclusions’ to S. Carleo and C. Langella.

Notes

1) For more information, visit the webpage: reclassificazioni.it/portal_main.php?portal_view=public_custom_page&id=25 [Accessed 10 October 2023].

2) The project was developed within the Hybrid Design Lab and involved researchers from the ‘Luigi Vanvitelli’ University of Campania and speech therapists from the Local Health Authority Napoli 2 Nord. Research Team: S. Carleo, C. Langella, M. De Luca.

3) The project was developed as part of a collaboration between the Hybrid Design Lab, the IUAV University of Venice, and experts in physiotherapy and neurocognitive rehabilitation. Research Team: L. Piccin, C. Langella, M. Mometti, D. Schettino.

References

- Aggogeri, F., Pellegrini, N. and Adamini, R. (2016), “Functional design in rehabilitation – Modular mechanisms for ankle complex”, in *Applied Bionics and Biomechanics*, article 9707801, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1155/2016/9707801 [Accessed 10 October 2023].
- Andrich, R. (2011), *Concetti generali sugli ausili*, Fondazione Don Gnocchi Onlus, Milano. [Online] Available at: portale.siva.it/files/doc/library/a383_1_Andrich_ausili_concetti_generali.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Bellina, F. and Jungmann, S. (2023), “How Start-ups and Established Organisations Together Can Drive Meaningful Healthcare Innovation in Personalised Medicine and AI”, in Cesario, A., D’Oria, M., Auffray, C. and Scambia, G. (eds), *Personalized Medicine Meets Artificial Intelligence – Beyond ‘Hype’, Towards the Metaverse*, Springer, Cham, pp. 171-189. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-32614-1_13 [Accessed 10 October 2023].
- Bisson, M., Alberti di Catenajo, S. A. and Palmieri, S. (2019), “MERLINO – Realtà Virtuale per la Stimolazione di Processi Neurocognitivi | MERLINO – Virtual Reality for Stimulation of Neuro-cognitive Processes”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 175-182. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5202019 [Accessed 10 October 2023].
- Bitkina, O. V., Kim, H. K. and Park, J. (2020), “Usability and user experience of medical devices – An overview of the current state, analysis methodologies, and future challenges”, in *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 76, article 102932, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ergon.2020.102932 [Accessed 10 October 2023].
- Bracco, F., Morozzo della Rocca, M. C., Delprino, F. and Pregaglia, S. (2022), “Apprendimento tramite simulazione e tool digitali – Una sperimentazione per la Farmacia dei Servizi | Simulation-based learning and digital tools – A trial for Pharmacy Services”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 270-279. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12242022 [Accessed 10 October 2023].
- Bright, F. A. S., Kayes, N. M., Worrall, L. and McPherson, K. M. (2015), “A conceptual review of engagement in healthcare and rehabilitation”, in *Disability and Rehabilitation*, vol. 37, issue 8, pp. 643-654. [Online] Available at: doi.org/10.3109/09638288.2014.933899 [Accessed 10 October 2023].
- Chiapponi, M. (2003), “Health Care Technologies – The Contribution of Industrial Design”, in Fortunati, L., Katz, J. E. and Riccini, R. (eds), *Mediating the Human Body*, Routledge, New York, pp. 207-214.
- Chiapponi, M. (1999), *Dalla cura delle cose alla cura delle persone – Design industriale e sanità*, Silvana Editoriale, Cinisello Balsamo.
- Corsi, G., Gagliardi, G. and Gregori, L. (2020), “SMAAV e DILLO – Nuovi strumenti per la valutazione e il trattamento clinico del linguaggio dall’incontro tra linguistica, logopedia e informatica”, in Dovetto, F. M. (ed.), *Lingua e patologia – I sistemi instabili*, Aracne, Centerano (RM), pp. 357-385. [Online] Available at: researchgate.net/publication/344202356_SMAAV_e_DILLO_Nuovi_strumenti_per_la_valutazione_e_il_trattamento_clinico_del_linguaggio_dall_incontro_tra_linguistica_logopedia_e_informatica [Accessed 10 October 2023].
- Dottorini, M., Paneroni, M. and Mantovani, M. E. (2022), “Diverse modalità di erogazione delle prestazioni (in-out-patient, teleriabilitazione, riabilitazione domiciliare) | Different ways of providing rehabilitation services (in-out-patient, tele-rehabilitation, home rehabilitation)”, in *Rassegna di Patologia dell’Apparato Respiratorio*, vol. 37, fascicolo 1, suppl. 1, pp. 81-85. [Online] Available at: doi.org/10.36166/2531-4920-suppl.1-37-2022-23 [Accessed 10 October 2023].
- Ferrari, A. (1996), *Le ortesi nella paralisi cerebrale infantile*, Dispense per la lezione ‘Clinica Riabilitativa ed Ausili’ nel corso ‘Gli Ausili Tecnici’, Fondazione Don Gnocchi, Milano.
- Fries, R. C. (2021), *Handbook of medical device design*, CRC Press, Boca Raton.
- Giacomin, J. (2014), “What is human centred design?”, in *The Design Journal | An International Journal for All Aspects of Design*, vol. 17, issue 4, pp. 606-623. [Online] Available at: doi.org/10.2752/175630614X14056185480186 [Accessed 10 October 2023].
- Giambattista, A. (2019), “Design and Medicine – Between scientific synergies and experiential outcomes”, in *DI-ID disegno industrial | industrial design*, vol. 69, pp. 74-81.
- Iacoboni, M. (2009) “Imitation, empathy, and mirror neurons”, in *Annual Review of Psychology*, vol. 60, pp. 653-670. [Online] Available at: doi.org/10.1146/annurev.psych.60.110707.163604 [Accessed 10 October 2023].
- Johnson, T., Das, S. and Tyler, N. (2021), “Design for health – Human-centered design looks to the future”, in *Global Health | Science and Practice*, vol. 9, Supplement 2, pp. S190-S194. [Online] Available at: doi.org/10.9745/GHSP-D-21-00608 [Accessed 10 October 2023].
- Kaur, A. (2018), *Physiotherapy for Facial Palsy – The Facial Rehabilitation Guide*, FSP Media Publications, New York.
- Koren, Y., Shpitalni, M., Gu, P. and Hu, S. J. (2015), “Product design for mass-individualization”, in *Procedia Cirp*, vol. 36, pp. 64-71. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.050 [Accessed 10 October 2023].
- Ku, B. and Lupton, E. (2022), *Health design thinking – Creating products and services for better health*, MIT Press, Cambridge.
- Langella, C. (2019), *Design e Scienza*, ListLab, Milano.
- Langella, C. (2021), “Medical Design”, in Sbordone, M. A. (ed.), *Smart and safe – Design for medical emergency and hi-performative dress*, ListLab, Milano, pp. 85-100.
- Langella, C. and Pontillo, G. (2023), *Health design evolution – Sustainable health design in the Digital Era*, Altralea, Firenze.
- Larcan, G. (2007), *Gli ausili – Importanza e ruolo nel progetto riabilitativo*, Fondazione Don Gnocchi, Milano. [Online] Available at: portale.siva.it/files/doc/library/A07_Larcan_Giovanni.pdf [Accessed 10 October 2023].
- Lewis, R. E. and Lupton, E. (2021), “What is health design and why should it be central to your clinical practice in 2021”, in *European Journal of Emergency Medicine*, vol. 28, issue 3, pp. 169-170. [Online] Available at: doi.org/10.1097/MEJ.0000000000000821 [Accessed 10 October 2023].
- Lockwood, T. (2014), *Design thinking – Integrating innovation, customer experience, and brand value*, Skyhorse Publishing, New York.
- Melles, M., Albayrak, A. and Goossens, R. (2021), “Innovating health care – Key characteristics of human-centered design”, in *International Journal for Quality in Health Care*, vol. 33, issue supplement 1, pp. 37-44. [Online] Available at: doi.org/10.1093/intqhc/mzaa127 [Accessed 10 October 2023].
- Mishra, P. and Sandhu, J. S. (2021), “Design is an Essential Medicine”, in *Global Health | Science Practice*, vol. 9, supplement 1, pp. S195-S208. [Online] Available at: doi.org/10.9745/GHSP-D-21-00332 [Accessed 10 October 2023].
- Morris, D. (2013), *Dictionary of communication disorders*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Pereno, A. (ed.) (2023), *Sustainability in MedTech Design – Methods, Tools and Practice*, Edizioni Ambiente, Milano.
- Privitera, M. B., Design, M. and Johnson, J. (2009), “Interconnections of basic science research and product development in medical device design”, in *2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, IEEE, Minneapolis (MN), pp. 5595-5598. [Online] Available at: doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5333492 [Accessed 10 October 2023].
- Shadlyn, T., Hubbard, L., Maly, T. and Dalgish, H. (2022), “A marriage in practice – The role of design research in the world of medical science”, in Lockton, D., Lenzi, S., Hekkert, P., Oak, A., Sádaba, J. and Lloyd, P. (eds), *DRS2022 | Conversations, Bilbao, 27 June-3 July, Bilbao, Spain*. [Online] Available at: doi.org/10.21606/drs.2022.956 [Accessed 10 October 2023].
- Umair, M. and Kim, W. S. (2015), “An online 3D printing portal for general and medical fields”, in *CICN 2015 – Seventh International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, 12-14 December 2015, Jabalpur, MP, India*, IEEE, pp. 278-282. [Online] Available at: doi.org/10.1109/CICN.2015.62 [Accessed 10 October 2023].
- Vink, P. and van Eijk, D. J. (2007), “The effect of a participative product design process on user performance”, in *Safety Science*, vol. 45, issue 5, pp. 567-577. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ssci.2007.03.001 [Accessed 10 October 2023].
- Voorheis, P., Zhao, A., Kuluski, K., Pham, Q., Scott, T., Sztur, P., Khanna, N., Ibrahim, M. and Petch, J. (2022), “Integrating behavioral science and design thinking to develop mobile health interventions – Systematic scoping review”, in *JMIR mHealth and uHealth*, vol. 10, issue 3, article e35799, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.2196/35799 [Accessed 10 October 2023].
- Wang, Z., Cui, L., Guo, W., Zhao, L., Yuan, X., Gu, X., Tang, W., Lingguo, B. and Huang, W. (2022), “A design method for an intelligent manufacturing and service system for rehabilitation assistive devices and special groups”, in *Advanced Engineering Informatics*, article 101504, vol. 51, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aei.2021.101504 [Accessed 10 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	10 September 2023
Revised	04 October 2023
Accepted	19 October 2023
Published	31 December 2023

SMART HUBS

Una rete di oggetti urbani multifunzionali a supporto della micromobilità a Ferrara

SMART HUBS

A network of multifunctional urban objects to support micromobility in Ferrara

Ilaria Fabbri

ABSTRACT

Il tema indagato è estremamente attuale perché si confronta con le sfide della mobilità sostenibile, l'offerta e la gestione dei servizi di prossimità. Il contributo illustra principi ed esiti del progetto di strutture urbane implementabili attualmente in corso di sperimentazione a Ferrara, finalizzate ad arricchire l'offerta di ricarica per piccoli veicoli elettrici e a monitorare la qualità dell'aria. Tali arredi urbani pilota, denominati Smart Hubs, incorporano elementi di modularità a più livelli, agevolandone la produzione, l'installazione e la manutenzione. Ciò che viene evidenziato come aspetto di maggiore originalità è la creazione di un sistema multifunzionale capace di 'ordinare' gli oggetti urbani che sempre più spesso si stratificano con disomogeneità nello spazio pubblico, rendendolo personalizzabile, aperto agli apporti della comunità e alle esigenze locali espresse durante un percorso di co-creazione.

The investigated topic is highly relevant as it addresses the challenges of sustainable mobility, the provision, and management of local services. This contribution outlines principles and outcomes of the implementable urban installation project currently being tested in Ferrara, aimed at enhancing the charging infrastructure for small electric vehicles and monitoring air quality. These pilot urban installations, referred to as Smart Hubs, incorporate multi-level modularity, facilitating their production, installation, and maintenance. What is highlighted as the most original aspect is the creation of a multifunctional system capable of 'organising' urban objects that increasingly accumulate with heterogeneity in public spaces, making them customisable, open to community input, and responsive to local needs expressed during a co-creation process.

KEYWORDS

qualità dell'aria, micromobilità elettrica, servizi urbani, prototipi modulari, prossimità diversificata

air quality, electric micromobility, urban services, modular prototypes, diverse proximity



Ilaria Fabbri, Architect with a PhD, is a Researcher at the School of Architecture and Design, University of Camerino (Italy). She works mainly on urban services that promote healthy lifestyles, and regeneration through commerce, sports activities and inclusion of people with disabilities. He has developed and patented several prototypes of urban furniture and objects tested in real contexts. E-mail: ilaria.fabbri@unicam.it

Lo spazio aperto pubblico contemporaneo è connotato da una grande complessità per la compresenza di numerose istanze: mobilità, scambio e aggregazione, ma anche criticità quali congestione, degrado, conflitto sociale e inquinamento atmosferico, quest'ultimo responsabile di 4,2 milioni di morti premature nel 2019 (WHO, 2022). Secondo il più recente Rapporto di Legambiente dal titolo *Mal' Aria di Città* (Minutolo, Frasso and Pandolfo, 2023), l'inquinamento atmosferico in Italia decresce ancora troppo lentamente, mettendo a rischio la salute dei cittadini che cronicamente sono esposti a concentrazioni di inquinanti ancora troppo elevate. Anche la European Environmental Agency (EEA, 2023) conferma tale trend negativo: i trasporti continuano a costituire una fonte significativa di inquinamento atmosferico, soprattutto nelle città, e circa il 30% del totale nazionale delle emissioni di gas serra¹, nonostante i pur positivi effetti dell'introduzione di norme sulle emissioni dei veicoli e l'uso di tecnologie più pulite.

Oltre a impattare sulla qualità dell'aria, il traffico veicolare non solo è responsabile di incidenti gravi, inquinamento acustico e danno materico a edifici e monumenti, ma limita anche l'esperienza sociale dello spazio esterno e influenza negativamente il benessere mentale di chi lo attraversa (Hematian and Ranjbar, 2022). La restrizione dell'uso del veicolo privato, il miglioramento dell'offerta del trasporto pubblico e la realizzazione di nuove infrastrutture a supporto degli spostamenti pedonali e ciclabili si sono comunque rivelate misure efficaci per la riduzione dei costi ambientali e di salute pubblica connessi all'inquinamento urbano.

Tali politiche devono tuttavia essere integrate con altre azioni volte a garantire un ambiente sicuro, sano e attrattivo (Gianfrate and Longo, 2018), obiettivo che non può trascurare un'azione sugli oggetti che popolano lo spazio pubblico: panchine, rastrelliere, chioschi, fontanelle, sedute e altri innumerevoli elementi apparentemente di sfondo possono essere capaci di influenzare in modo significativo il carattere della città e il comportamento di chi la vive (Hassanein, 2017; Prvanov, 2017; Magnago Lampugnani, 2021; Fig. 1).

Lungo i marciapiedi, nelle piazze e negli spazi urbani di oggi non è raro imbattersi in arredi differenti per tipologia e qualità, spesso accostati in modo caotico e obsoleti sul piano tecnologico e funzionale o, ancora, dismessi, abbandonati; la loro presenza può portare a una riduzione nella qualità percepita dello spazio, o, per usare la metafora di Richard Sennett (2020), a un discorso urbano – 'nel quale gli arredi sono considerati l'equivalente delle virgolette' – non pienamente comprensibile e godibile. L'esigenza di semplificare l'immagine della città e di organizzare le dotazioni urbane secondo concetti di ordine compositivo e modulare ricorre in numerose ricerche e documenti a carattere operativo, come, ad esempio, le Linee Guida Urban Care (Ordine degli Architetti di Milano et alii, 2015), poi confluite nelle Linee Guida di Progettazione dello Spazio Pubblico promosse dal Comune di Milano e dall'Agenzia Mobilità Ambiente e Territorio (2021).

La recente diffusione nel contesto metropolitano di mezzi di trasporto privato alimentati da energia elettrica, e il conseguente proliferare di attrezzature per la gestione dei veicoli (colonnine di ricarica, stazioni solari di e-bike sharing, infopoint interattivi, etc.) incrementa ulteriormente la com-

plexità, e spesso la disomogeneità, dello spazio urbano. È in questo contesto che il Design può offrire un apporto considerevole alla definizione di soluzioni sostenibili a livello di sistema, cioè come insieme integrato di servizi-prodotti-comunicazione (Camplone, 2019) in risposta a una triplice esigenza: favorire la mobilità sostenibile, arricchire l'esperienza del passeggiare, pedalare o sostare all'aperto e riordinare l'insieme dei piccoli oggetti urbani presenti nello spazio pubblico.

Alla luce di tali considerazioni il testo illustra l'esperienza condotta a Ferrara relativa al progetto di strutture urbane modulari che concentrano più servizi, anche a promozione della micromobilità elettrica, brevettate nell'ambito del progetto europeo Air Break. Dapprima il contributo inquadra il fenomeno della diffusione dei veicoli elettrici in città e la conseguente evoluzione degli oggetti urbani a supporto dei nuovi mezzi di trasporto, mettendo in evidenza gli elementi di modularità propri di tali casi studio; successivamente si illustrano gli obiettivi, le scelte di ordine compositivo e modulare e gli apporti del processo di co-design che hanno condotto alla proposta degli Smart Hubs; conclude il contributo una riflessione sugli sviluppi futuri e i primi risultati raccolti dalla sperimentazione in atto.

La ricerca si colloca nel campo del 'design del prodotto', e al contempo guarda con interesse alle strategie del progetto urbano per ridisegnare spazi pubblici più attraenti e sicuri, anche attraverso la costruzione di comunità più consapevoli e partecipi a un tema complesso come quello della qualità dell'aria. Si ritiene pertanto che il testo possa essere di interesse per i ricercatori afferenti alle molteplici discipline del progetto, impegnati su temi chiave quali il design di servizi innovativi, la progettazione e gestione di spazi pubblici, lo sviluppo sostenibile; il paper è inoltre rivolto alle istituzioni pubbliche, alle agenzie per la mobilità e le società multiservizi, ma anche agli enti di promozione del turismo e dell'attività sportiva, e a tutti i cittadini, in quanto prosumer – produttori e consumatori – di inquinamento atmosferico.

Sistemi e oggetti d'arredo per la micromobilità elettrica | E-bike, monopattini e tricicli elettrici, segway e hoverboard hanno rivoluzionato il modo di spostarsi in città negli ultimi anni, rendendolo più comodo, agevole e al tempo stesso sostenibile ed economico. I veicoli leggeri ad alimentazione elettrica offrono nuove opportunità anche alle persone con ridotte capacità motorie, e la prospettiva di poter raggiungere in autonomia distanze maggiori in un minor tempo; se confrontate con i modelli tradizionali, le biciclette a pedalata assistita agevolano il superamento dei dislivelli del terreno pur assicurando una forma di esercizio fisico sana e a basso impatto.

Inizialmente considerata una moda passeggera, la micromobilità continua a crescere: secondo il Report Ecosistema della Bicicletta edito da Banca Ifis e Marketwatch PMI (2021), gli operatori di settore prevedono di raggiungere nel 2030 i 17 milioni di bici elettriche, superando così la vendita delle biciclette muscolari. In Italia la vendita di e-bike dal 2015 al 2020 è addirittura quintuplicata e in crescita è anche il mercato dei monopattini elettrici, alla cui diffusione in Italia dal 2020 ha contribuito in modo massiccio il bonus previsto dal decreto Rilancio. Proprietà o noleggio di medio-lungo termine o per il singolo tragitto rappresentano

opzioni legate al tipo di mezzo elettrico di cui si ha necessità: il Boston Consulting Group (Lang et alii, 2022) ha stimato che, mentre per le bici elettriche il noleggio e lo sharing rappresentano a livello globale ancora un fatturato trascurabile rispetto all'acquisto, per i monopattini elettrici lo sharing vale già il doppio (Fig. 2).

A trasformarsi in relazione a questa nuova mobilità, oltre al Codice della Strada, è stata anche l'interfaccia fisica del servizio con i quartieri, dove si registra un crescente presenza di installazioni ed elementi stradali, spesso estremamente variegati in termini di estetica e dotazione tecnologica, talvolta disomogenei all'interno del paesaggio urbano. Dove parcheggiare monopattini elettrici è un altro tema cruciale a cui il progetto urbano convenzionale non sempre fornisce risposte adeguate, mentre i posteggi di microveicoli potrebbero integrarsi con altri elementi (stazione di ricarica, chiosco informazioni, vegetazione e pensiline) e offrire una gamma più vasta di servizi (Tan and Tamminga, 2020).

I nuovi oggetti urbani dedicati alla micromobilità elettrica possono ricondursi a tre famiglie ricorrenti di prodotti, con livello incrementale di complessità: colonnine di ricarica a sviluppo verticale, pensiline coperte e arredi multifunzionali. Del primo gruppo fanno parte elementi come la stazione di assistenza e ricarica e-bike Clorofilla Power (Fig. 3), prodotta dalla cesenate Buratti Meccanica e vincitrice del prestigioso Design & Innovation Award 2020 per la categoria Turismo; il modulo è rappresentato da un cilindro cavo di altezza 150 cm, saldato su una piastra dotata di pompa a pedale, su cui si innestano servizi incrementabili e personalizzabili: due bracci gommati per appendere qualunque tipo di bici, prese schuko a diverse altezze e utensili per la risoluzione dei più comuni guasti meccanici.

Altri casi studio rilevanti rientrano in questa prima famiglia, come il concept elaborato da Entwurfreich (Fig. 4), la cui costruzione modulare consente diverse varianti: palo asolato per il posteggio sicuro di biciclette classiche e colonna di ricarica per e-bike, con o senza integrazione superiore luminosa. Il V-Pole di Douglas Copland (Fig. 5) coniuga invece tecnologia e arte pubblica; in un unico elemento di 3,8 metri di altezza attrezzato per l'illuminazione stradale si concentrano hot-spot wi-fi, prese di ricarica, un dispositivo di controllo della sosta veicolare e altre funzioni implementabili con la logica dei mattoncini LEGO; in questo caso il criterio di modularità è impiegato intenzionalmente per ridurre il 'disordine' visivo determinato dalla compresenza di servizi diversi.

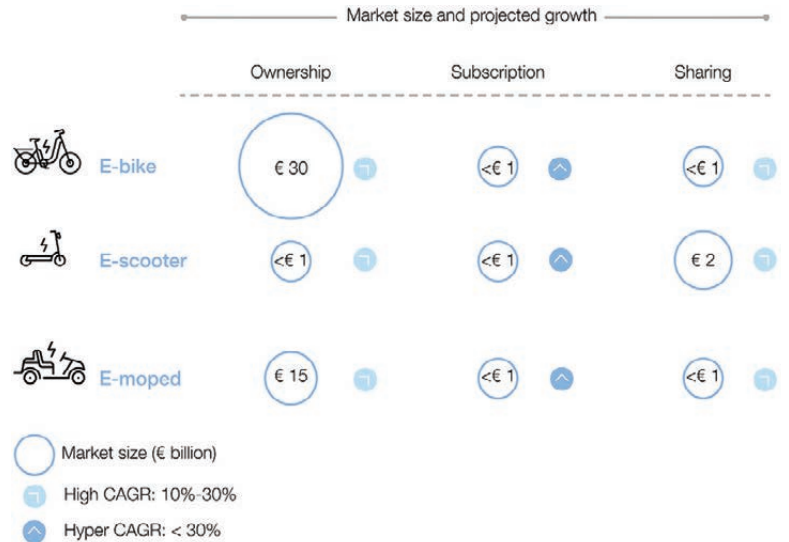
I prodotti riconducibili al secondo gruppo sono essenzialmente caratterizzati da coperture che integrano moduli fotovoltaici per alimentare la mobilità elettrica con energia altrettanto sostenibile. E-move Charging Station (Fig. 6) è un prototipo disegnato da Valentin Runggaldier nel 2009 per la Città di Bolzano: l'elevata inclinazione della struttura metallica, che ricorda una stazione di benzina in miniatura, ottimizza l'irraggiamento solare sui pannelli fotovoltaici mentre sul lato esterno della pensilina è presente una seduta in materiale idrorepellente che consente ai passanti di fare una sosta ed eventualmente ricaricare il proprio smartphone.

Rientrano infine tra gli arredi multifunzionali quegli oggetti urbani di scala anche molto diversa tra loro, ma accomunati dal duplice obiettivo di



Fig. 1 | Street furniture in a lively public space in Hafencity, Hamburg (credit: I. Fabbri, 2015).

Fig. 2 | Global micromobility market trends by vehicle and by usage: whether ownership, subscription, in which the individual rents the vehicle for a specific period and is the sole user, or sharing, in which the provider's vehicle is used for a single ride (credit: I. Fabbri, based on BCG 2021 Global Micromobility Market Trends).



offrire servizi aggiuntivi all'utente che si sposta con un mezzo elettrico e di creare una 'smart island' per il tempo libero e il lavoro (Marano, 2019). Un esempio interessante è ChillOut Hub (sviluppato nell'ambito del progetto Smart Social Spaces, una collaborazione tra Georges River Council, Street Furniture Australia, University of New South Wales e University of Sydney): il sistema modulare, che crea punti di aggregazione connessi, flessibili e ombreggiati, non è un servizio specificamente pensato per la mobilità elettrica, ma nelle sue varie configurazioni ne accoglie le esigenze. Ogni stazione si compone di una struttura modulare ad albero, elementi di arredo urbano e dispositivi IoT integrati in grado di monitorare il numero di utenti, il tempo di utilizzo dei servizi e il microclima (Fig. 7). ChillOut Hub ha vinto il prestigioso Australian Good Design Award 2022, livello oro, nella categoria design del prodotto, commercio e industria (Fig. 8).

Altro pluripremiato arredo multifunzionale è la panchina tecnologica E-Lounge di Repower, disegnata da Lanzillo&Partners e insignita nel 2020 del Compasso d'Oro ADI. E-Lounge offre un servizio di ricarica per e-bike e device come tablet e smartphone, ma anche una seduta urbana con rastrelliera integrata, wi-fi e illuminazione (Fig. 9). Lo studio sullo stato dell'arte degli arredi dedicati alla micromobilità elettrica suggerisce di adottare nel progetto un approccio modulare ancor più marcato, sia per una maggiore versatilità del servizio sia per sperimentare ulteriori possibilità di aggregazione di dotazioni urbane differenti in un unico manufatto, ai fini di migliorare le proprietà ergonomiche ed estetiche degli spazi aperti (Dembich et alii, 2020).

Contesto e obiettivi della ricerca | Gli elementi urbani modulari oggetto di questo contributo sono stati sviluppati nell'ambito di Air Break, un progetto finanziato dal programma europeo Urban Innovative Actions con una copertura finanziaria di 5 milioni di euro, di cui l'80% a carico dell'Unione Europea, e coordinato dal Comune di Ferrara insieme all'Università degli Studi di Ferrara, Sipro Ferrara, Politecnico di Milano, Fondazione Bruno

Kessler, Dedagroup Public Services srl, LabService Analytica e HERA Spa.

Gli obiettivi di Air Break sono la riduzione del 25% dei livelli di inquinamento ambientale in tre anni in specifiche aree critiche di Ferrara, il miglioramento del benessere e della sicurezza dei pendolari e la comunicazione in tempo reale della qualità dell'aria; il progetto è partito nell'autunno del 2020, adottando fin da subito due approcci distinti ma integrati: la realizzazione di interventi fisici (infrastrutture legate alla mobilità, al verde, al corredo urbano e alla sensoristica) e il coinvolgimento della collettività mediante attività di co-creazione, monitoraggio partecipativo della qualità dell'aria e strategie per incentivare comportamenti rispettosi dell'ambiente.

Numerose ricerche, tra le quali la sperimentazione condotta tra il 2018 e il 2019 a Torino nell'ambito del programma Innovation for Change, dimostrano come effettivamente la partecipazione attiva nel monitoraggio dell'aria rappresenti un volano importante per la diffusione della consapevolezza su questo tema (Vrenna and Crétier and Landén, 2019) e per garantire una maggiore efficacia delle misure volte alla riduzione dei livelli di inquinamento. COMPAIR, ad esempio, è un progetto lanciato nel 2021 dall'ECSA (European Citizen Science Association) che incentiva l'uso di sensori digitali per il monitoraggio della qualità dell'aria da parte dei cittadini di cinque città europee (Atene, Berlino, Sofia, Plovdiv e regione delle Fiandre) e promuove la co-progettazione di politiche e comportamenti sostenibili per migliorarne la qualità.²

Anche il progetto europeo VARCITIES adotta un approccio partecipativo per la trasformazione di spazi pilota in luoghi sicuri, accessibili e sani; nella città maltese di Gzira è in corso una sperimentazione lungo la trafficata Rue D'Argens volta alla riduzione dell'inquinamento atmosferico mediante tre azioni combinate che vedono il coinvolgimento dei cittadini: l'incremento delle aree verdi, l'installazione domestica di sensori per l'analisi ambientale e la riprogettazione di spazi di gioco presso strutture scolastiche.³

Di grande interesse anche il dispositivo sviluppato dell'italiana FAE Technology con il Sen-

seable City Lab del Massachusetts Institute of Technology di Boston nell'ambito di City Scanner, progetto che trasforma le vetture in centraline mobili di sensori. Con il rilevatore Flatburn ogni cittadino può misurare l'inquinamento atmosferico locale, identificarne le fonti e, idealmente, contribuire a ridurlo⁴, pur non offrendo un nuovo prodotto o servizio che incentivi un cambio di abitudini in termini di mobilità.

Analogamente ai progetti sopramenzionati, Air Break intercetta i diversi obiettivi delle politiche attuali per prevenire o ridurre gli effetti nocivi sulla salute umana e sull'ambiente dell'inquinamento atmosferico, come la Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo⁵, le raccomandazioni emesse dall'EEA con il Rapporto 24/2018⁶, il Decreto Legge n. 155/2010⁷ e, a livello locale, il Piano Regionale Integrato dell'Aria (PAIR 2020)⁸, il Piano Regionale Integrato dei Trasporti (PRIT2025)⁹, che mira a raggiungere il 20% della mobilità in bicicletta entro il 2025, e il Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (SUMP) di Ferrara¹⁰ (Verga, 2021).

Smart Hubs: modularità del prodotto | Gli Smart Hubs sono stati progettati e brevettati da HERA Spa con il gruppo di ricerca Next City Lab (Architetti Gabriele Lelli e Ilaria Fabbri), a partire dalle sperimentazioni pregresse in tema di servizi urbani condotte per la multi utility dallo stesso Team di Ricerca afferente al Dipartimento di Architettura di Ferrara. Smart Hub è in primo luogo un punto di raccolta dati del metabolismo della città, un supporto fisico per ospitare e proteggere un sistema di sensori che monitorano la qualità ambientale, la sicurezza e i flussi urbani; in secondo luogo è un elemento urbano multifunzionale, (del tipo 'all-in-one solution') che, in un ingombro di circa 16 mq nella versione di base, concentra numerosi servizi, a partire da un sistema di ricarica e posteggio per piccoli veicoli elettrici, e ulteriori funzioni personalizzabili.

I criteri guida del progetto sono stati la multifunzionalità, la flessibilità d'uso, la riproducibilità, la trasportabilità, la compattezza e l'attrezzabilità, categorie storicamente più tipiche del progetto e del mercato americano (Dellapiana, 2022), e che

oggi, in relazione alla trasformazione degli arredi urbani offrono la possibilità di ripensare e riorganizzare la galassia di elementi che popolano il paesaggio urbano.

La concezione modulare presuppone che le parti di un oggetto siano indipendenti e possano essere utilizzate autonomamente ma anche combinate tra loro; questo approccio consente di modificare l'interazione tra le diverse componenti di un prodotto – per accogliere nuove necessità d'uso o riparare un singolo elemento, ad esempio – senza incidere sul design di base.

A livello di arredo urbano tale criterio si ritrova più frequentemente applicato ai sistemi di sedute e panchine, come evidenziato, tra gli altri, da Hasanein (2017) e da Prvanov (2017), prevalentemente per creare diverse configurazioni e favorire l'interazione, o ai chioschi temporanei (Dembich et alii, 2020), per un assemblaggio e smantellamento più veloci. Il tema della modularità ha toccato, con diverse accezioni, tutte le fasi del processo di sperimentazione degli Smart Hubs, dal disegno dell'oggetto e dei suoi servizi, all'inserimento nei quartieri e alla definizione di una rete urbana, fisica e virtuale. Ogni Smart Hub è costituito da un'unità strutturale, da una o più unità funzionali specializzate e da un'infrastruttura tecnologica IoT.

L'unità strutturale consiste in un telaio metallico verniciato, autoportante, che non necessita di fondazioni né di interventi sulla pavimentazione esistente, per semplificare l'installazione e consentire un eventuale spostamento in caso di mutate necessità urbane. Il telaio è costituito da pilastri in acciaio a sezione rettangolare, di dimensioni commerciali pari a 300 x 50 mm, la cui cavità interna è sfruttata per il passaggio dei cavi; gli scatolari reggono un elemento di copertura stonato, anch'esso di sezione rettangolare, su cui sono posizionati pannelli in vetro fotovoltaico che contribuiscono al fabbisogno elettrico dei servizi presenti. Al di sotto della copertura una barra cablata per la ricarica di piccoli mezzi di trasporto funge al contempo da irrigidimento degli scatolari verticali e da superficie per il fissaggio per le rastrelliere.

La struttura è uno scheletro che può accogliere diverse unità funzionali specializzate, veri e propri moduli progressivamente implementabili che offrono molteplici possibilità di assemblaggio a seconda dei servizi richiesti e dei siti di installazione, permettendo così un elevato grado di personalizzazione: stazione automatizzata per la consegna e il ritiro di pacchi tramite corriere, armadietto con la strumentazione di base per effettuare piccole riparazioni, pompa a pedale, defibrillatore da esterno, sistema di comunicazione in caso di emergenza, piano di lavoro, prese per l'alimentazione di dispositivi elettronici o per la ricarica di veicoli per persone con disabilità motoria: la compresenza e l'uso simultaneo delle unità funzionali specializzate non interferisce con le operazioni di posteggio dei mezzi. Smart Hub si configura un 'mobile componibile da esterno', un organismo minimo ed efficiente 'con misure adeguate a svolgere tutte le attività in sicurezza, risparmiando tempo ed energie' (Bombaci, 2020; Fig. 10).

Il Team di Ricerca ha inoltre previsto la possibilità di trasformare Smart Hub in una pensilina per l'attesa dei mezzi pubblici, tramite la riconfigurazione dell'unità strutturale minima e di alcune componenti funzionali: priva di sbalzi alle estremità, l'unità prevede la disposizione dei pilastri sui due assi mentre la barra cablata è sostituita da una lamiera fissata alla parte inferiore degli scatolari verticali, che funge da zavorra per la stabilità, e, piegandosi, da scocca a protezione del vano tecnico, da piano di appoggio e da seduta. Questo ulteriore prototipo è stato installato nel Comune di Castel Bolognese (RA) nell'ambito di una specifica ricerca connessa al miglioramento del servizio di trasporto pubblico nei centri urbani sotto i 10.000 abitanti.

A livello compositivo le valenze estetiche si fondono con il carattere funzionale: la scelta di sezioni costanti da 50 mm per pilastri ed elemento di copertura è di matrice grafica e contribuisce alla leggerezza dell'insieme, unitamente alla soluzione d'angolo aperta. Il profilo superiore, stonato, crea un vassoio, un corpo astratto dal ruolo con-

creto di proteggere i veicoli sottostanti e alloggiare la sensoristica. Le diverse componenti si inseriscono senza mai coprire la struttura, che rimane continua e leggibile nelle varie combinazioni di moduli e gradi di accessorizzazione.

Alla scala del quartiere Smart Hub si confronta anche con un altro modulo, quello del parcheggio, integrandosi nella maggior parte dei contesti carababili; in questo caso l'ingombro dell'unità strutturale e del suo spazio d'uso, quando allestita con le varie componenti, rientra nella dimensione di due parcheggi in linea standard, sebbene il design contemporaneo ma discreto dell'oggetto si presti ad un inserimento anche in spazi pubblici più ampi. Il gruppo di ricerca ha inoltre sviluppato delle versioni più articolate che arrivano ad occupare fino a quattro parcheggi in linea, combinando la stazione per la ricarica di veicoli elettrici con altri servizi, affini per dotazione tecnologica e posizionamento, quali ad esempio un sistema innovativo per la raccolta dei rifiuti (Fig. 11).

In ultimo, l'infrastruttura tecnologica: Smart Hub alloggia in copertura un router per il wi-fi, delle telecamere per la videosorveglianza, uno strip led RGB e il kit di sensori per il rilevamento delle condizioni atmosferiche, che consente di mettere in relazione informazioni relative agli spostamenti urbani (come l'utilizzo di veicoli elettrici o del trasporto pubblico) e i dati ambientali. Nel saggio dal titolo *Healthy Transportation – A Question of Mobility or Accessibility* Andrew Mondschein (2018) evidenzia come la maggior parte delle ricerche sulla promozione di una mobilità sana valutino esclusivamente la frequenza e la distanza degli spostamenti non motorizzati, quando invece è fondamentale misurare anche l'esperienza di viaggio, sia in termini di qualità del tragitto che di salute derivante dallo spostamento.

Oggi la tecnologia consente facilmente, e a costi relativamente contenuti, di raccogliere informazioni sull'inquinamento acustico e atmosferico e su altri fattori che incidono sul comfort dell'utente quali temperatura, luce, umidità; l'installazione di questi sensori in corrispondenza delle infrastrut-



Fig. 3 | Chlorophyll recharge and repair station (credit: Buratti Meccanica).

Fig. 4 | Smartpole charging station features a modular construction that allows a base variant without electrics, to secure and park classical bikes, or a base extension with a light pole (credit: Entwurfreich).

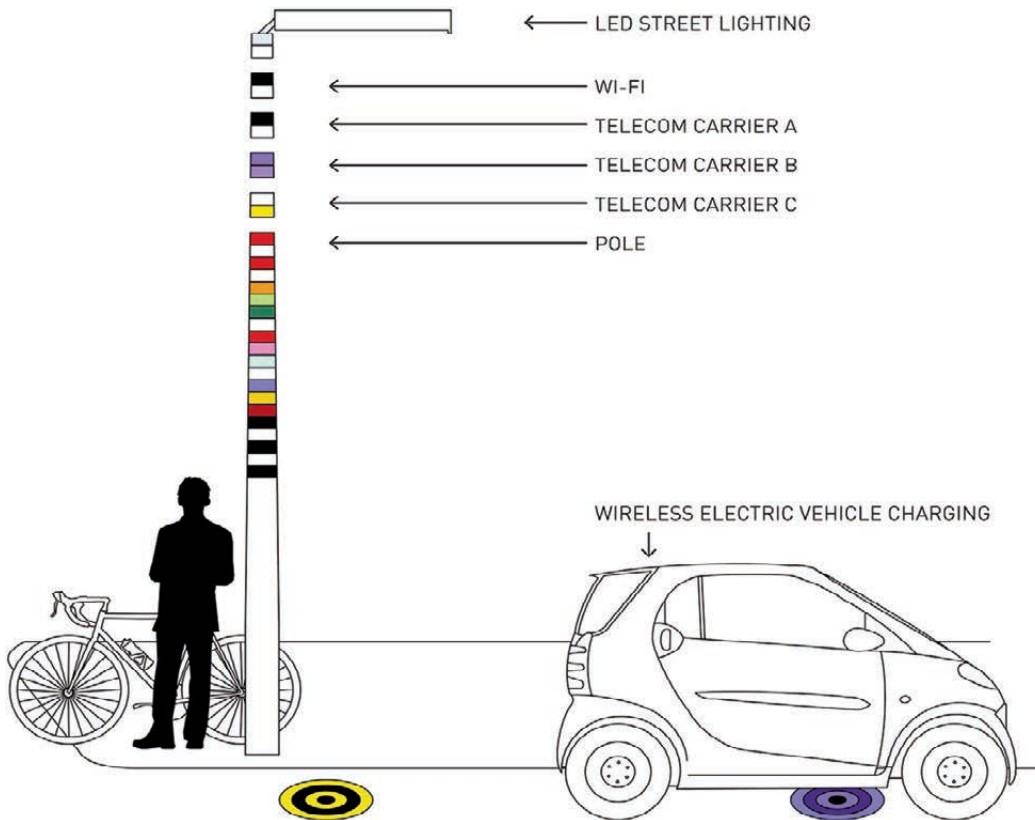


Fig. 5 | V-Pole (‘V’ for Vancouver), a slim, modular utility pole connected to underground optical wiring, delivering different services (source: dailyhive.com).

Fig. 6 | E-move charging station in Bozen, visualisation and prototype installed in Bozen (source: domusweb.it).

ture per la mobilità sostenibile, se aggregata ai dati di utilizzo del servizio, favorisce una migliore comprensione della correlazione tra scelte di viaggio e condizioni ambientali. Inoltre la concentrazione in uno stesso manufatto di più servizi per la mobilità dolce e sostenibile può offrire più motivazioni per spostarsi a piedi o in bicicletta, valorizzando le proprietà relazionali della prossimità (Manzini, 2021), generando socialità e più occasioni d’incontro e interazione tra le persone.

Metodologia e fasi della ricerca | La ricerca adotta un percorso metodologico per fasi che consente di ripetere la sperimentazione anche in altri contesti. La spina dorsale di tutto il progetto è il coinvolgimento della comunità, innanzitutto mediante un’analisi dei bisogni finalizzata alla scelta dei servizi da inserire in ambiti urbani di prossimità. Le do-

tazioni funzionali più idonee sono state infatti individuate e selezionate grazie all’apporto di cittadini, operatori economici e gruppi di interesse locali attraverso un percorso di co-creazione guidato dal Politecnico di Milano. I laboratori partecipativi si sono svolti principalmente online, fra ottobre 2020 e ottobre 2021, tramite Google Meet e la lavagna virtuale Miro (Fig. 12). La sostenibilità è diventata così un paradigma comportamentale, che fonde la componente hard del design, più legata alla morfologia e ai materiali, e quella soft delle relazioni, della condivisione, dell’innovazione sociale (Fagnoni and Olivastri, 2019).

La logica modulare che ha guidato il disegno del prodotto non solo agevola produzione e futura manutenzione, ma ha consentito di disegnare soluzioni specifiche per ogni contesto, seppur impiegando una stessa struttura di base. Definito il quadro esigenziale e i servizi da inserire, si è intrapreso il disegno generale del prototipo e delle modalità di inserimento delle componenti; contestualmente ha avuto inizio la fase di individuazione degli obiettivi urbani specifici. Anche per la scelta dei diversi contesti di installazione degli Smart Hub il Gruppo di Ricerca, insieme ad HERA Spa e all’Ufficio Tecnico del Comune di Ferrara, si è tenuto conto dei suggerimenti della comunità locale, raccolti con l’ausilio di interviste non strutturate e di osservazioni sul posto; sono stati quindi individuati i punti di convergenza di maggiore intensità dei flussi pedonali e ciclabili, gli slarghi e le piccole piazze antistanti edifici aperti al pubblico senza ancora una chiara identità funzionale ma con un potenziale di aggregazione da valorizzare (Fig. 13).

In termini di mobilità elettrica gli HUB dei quattro quartieri pilota rispondono a esigenze differenti: fermate e ricariche brevi durante lo svolgimento di attività ricreative, particolarmente rilevanti lungo la Darsena (Fig. 14), parcheggi diurni di lunga sosta, in prossimità della stazione ferroviaria (Fig. 15) e del

Tecnopolo (Fig. 16), e fermate di lunga sosta sia diurne che notturne di fronte alla piscina comunale nell’area residenziale Corti di Medoro (Fig. 17).

Una volta definita e validata la configurazione di ogni specifico HUB, si è intrapresa la valutazione economica della produzione del sistema e dell’allestimento del punto urbano scelto per poi avviare la fase di scouting delle aziende per la prototipazione. Riguardo ai costi di realizzazione dei prototipi si evidenzia preliminarmente che una produzione su numeri maggiori comporterà una riduzione del 50% circa rispetto gli importi necessari per le prime sperimentazioni; la struttura di base, priva di fondazioni, presenta un costo simile, ma competitivo (indicativamente il 5% in meno), rispetto la somma del costo di pensiline standard di pari dimensioni, con gli importi per l’esecuzione della fondazione, con i relativi collegamenti ed il ripristino della pavimentazione esistente.

In aggiunta alla soluzione standard, però, l’unità strutturale di Smart Hub è migliorativa, è cava e può essere completamente cablata, caratteristica essenziale per l’inserimento incrementale di servizi, mentre la copertura è predisposta per pannelli fotovoltaici su vetro o su pannello opaco. Il costo dello Smart Hub completamente accessorizzato è inoltre inferiore alla somma degli importi necessari per l’installazione di una pensilina e di altrettanti dotazioni e sensori considerati singolarmente nella città, che comunque necessitano di adeguato supporto, senza considerare il maggior utilizzo di spazio pubblico che questo secondo caso richiede.

Le successive fasi della ricerca hanno contemplato la verifica della funzionalità del prototipo in ambiente controllato (presso l’officina selezionata per la realizzazione), con conseguente revisione del design e dell’inserimento dei moduli, anche grazie al coinvolgimento di un’utenza di riferimento. Ha fatto seguito la fase di installazione e collaudo nei luoghi selezionati, la messa in attività e la programmazione della gestione dei servizi. Ogni Smart Hub è specificatamente progettato per durare a lungo nello spazio pubblico e garantire una semplice manutenzione, grazie alla possibilità di sostituzione delle dotazioni per componenti, favorire la percezione di una maggiore cura del bene pubblico e incentivare un maggior rispetto dello stesso.

Infine è stata attivata una fase di verifica dei risultati ottenuti dalla sperimentazione, della soddisfazione degli utenti e del gestore, nonché uno studio per valutare un eventuale ampliamento della rete degli HUB in città, con una logica di progetto incrementale.

Risultati della sperimentazione e sviluppi futuri

| Ad oggi Air Break è entrato nella sua fase conclusiva, senza significativi ritardi o variazioni rispetto il progetto originario, nonostante l’impatto della pandemia sulla prima fase, l’aumento dei prezzi e le difficoltà di reperimento di alcuni materiali. L’attivazione di una rete di 14 centraline ambientali, 4 delle quali a bordo degli Smart Hubs, e di altri sensori chimico-olfattivi è stata completata nel mese di Marzo del 2023: i dati rilevati hanno restituito una riduzione del 10% degli inquinanti atmosferici e del 20% di PM10 depositato rispetto all’anno 2019, anche grazie alla connessione della rete delle piste ciclabili e alla piantumazione di 2.000 alberi. Ma soprattutto, Air Break ha visto il coinvolgimen-

to di oltre 3.000 persone, tra imprese, gruppi di interesse, residenti e pendolari che hanno preso parte alle diverse iniziative di sensibilizzazione, monitoraggio e co-creazione.

Nonostante la sperimentazione sia ancora in corso e la diffusione sul territorio ferrarese per il momento limitata ai quattro quartieri pilota, questa esperienza fornisce un contributo alla ricerca teorica e applicata, essendo replicabile anche in altri contesti, grazie ai costi contenuti di realizzazione, alla struttura facilmente assemblabile e trasportabile e ai servizi gradualmente implementabili (Lelli and Fabbri, 2021). In ragione della volontà espressa dall'Amministrazione di Ferrara di estendere le infrastrutture sperimentali a tutto il territorio comunale e dell'interesse mostrato da altre Municipalità, il progetto affronterà tutte le criticità e i punti di debolezza emersi durante la fase di test: necessità di ottimizzare alcune connessioni strutturali e sostituzione di elementi di finitura anti vandalismo e furto degli strumenti di riparazione bici, che sono stati fissati alla struttura con agganci più robusti. Va tuttavia evidenziato che gli atti di vandalismo si sono verificati prima dell'attivazione della rete di videosorveglianza a bordo degli Smart Hubs, dopodiché non si sono ripetuti fenomeni analoghi.

Tutt'ora sono in corso osservazioni sul campo e interviste agli utenti degli HUB che consentiranno di migliorare l'esperienza d'uso e incrementare l'utilizzo del servizio. Dalle rilevazioni finora effettuate si evince che, al di là del disegno dell'oggetto, il successo della proposta molto dipende dalla gestione dei servizi e dalla scelta della location. La gestione di tutti gli accessori è fondamentale: il sistema è efficace se tutte le sue componenti sono funzionanti e in rete (con possibilità di controllo da remoto dei dati ambientali e acustici, della videosorveglianza, dei dimmeraggi dell'illuminazione, etc.). La scelta del luogo di installazione dell'HUB deve essere inoltre molto attenta, deve intercettare un punto di passaggio e sosta realmente strategico e visibile per garantirne l'uso nel tempo; naturalmente, come evidenziato in precedenti

za, anche la scelta delle dotazioni deve essere opportuna. Ulteriori versioni vedranno inoltre l'affiancamento di Smart Hub a sistemi di erogazione d'acqua potabile, servizio particolarmente sinergico con il tema della mobilità dolce (Fig. 18).

In conclusione è possibile affermare che Smart Hub sia in grado di rispondere alle esigenze di arricchire i servizi nello spazio pubblico e l'offerta di ricarica per piccoli veicoli elettrici e di monitorare la qualità dell'aria. Il progetto di un sistema aperto, modulare e implementabile a seconda delle esigenze specifiche del quartiere, con diverse possibilità di personalizzazione e assemblaggio (Fig. 19), ha consentito di accorpare in un unico prodotto diversi servizi urbani, riordinando quegli elementi che spesso si accumulano con disomogeneità nell'ambiente esterno, e di rispondere, senza i costi di un prodotto su misura, alle necessità espresse o inesprese da utenti, comunità locale e territorio.

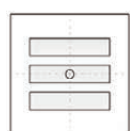
Contemporary public open space is marked by great complexity due to the co-presence of numerous instances: mobility, exchange and aggregation, but also critical issues such as congestion, degradation, social conflict and air pollution, the latter responsible for 4.2 million premature deaths in 2019 (WHO, 2022). According to the most recent Legambiente Report entitled *Mal'Aria di Città* (Minutolo, Frasso and Pandolfo, 2023), air pollution in Italy is still decreasing too slowly, putting at risk the health of citizens who are chronically exposed to concentrations of pollutants that are still too high. The European Environmental Agency (EEA, 2023) also confirms this negative trend: transportation continues to be a significant source of air pollution, especially in cities, and about 30 percent of total national greenhouse gas emissions¹, despite the albeit positive effects of the introduction of vehicle emission standards and the use of cleaner technologies.

In addition to impacting air quality, vehicular traffic is not only responsible for serious accidents, noise pollution, and material damage to buildings and monuments, but it also limits the social experience of outdoor space and negatively affects the mental well-being of those who pass through it (Hematian and Ranjbar, 2022). Restricting private vehicle use, improving public transport provision, and building new infrastructure to support pedestrian and bicycle travel have, however, proven to be effective measures for reducing the environmental and public health costs associated with urban pollution. However, these policies must be complemented with other actions aimed at ensuring a safe, healthy, and attractive environment (Gianfrate and Longo, 2018), a goal that cannot neglect action on the objects that populate public space: benches, racks, kiosks, drinking fountains, seating, and countless other seemingly background elements can be capable of significantly influencing the character of the city and the behaviour of those who live in it (Hassanein, 2017; Prvanov, 2017; Magnago Lampugnani, 2021; Fig. 1).

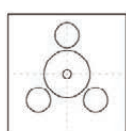
Along today's sidewalks, squares and urban spaces, it is not uncommon to come across furnishings that differ in type and quality, often chaotically juxtaposed and technologically and functionally obsolete or, again, disused, abandoned; their presence can lead to a reduction in the perceived quality of space, or, to use Richard Sennett's (2020) metaphor, to an urban discourse – 'in which furnishings are considered the equivalent of quotation marks' – that is not fully understandable and enjoyable. The need to simplify the image of the city and to organise urban endowments according to compositional and modular order concepts recurs in numerous research and documents of an operational nature, such as, for example, the Urban Care Guidelines (Ordine degli Architetti di Milano et alii, 2015), later merged into the Public Space Design Guidelines promoted by the Comune di Milano and the Agenzia Mobilità Ambiente e Territorio (2021).

Site-specific prototypes

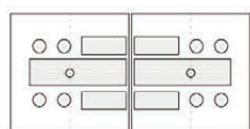
Modules were mixed-and-matched to create unique social spaces



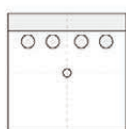
Module A
3500x3500 mm
Picnic table setting



Module B
3500x3500 mm
Circular benches + 3 tables



Module C
3500x7000 mm
Communal table setting



Module D
3500x3500 mm
Lookout table + 4 stools



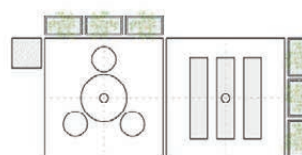
Escola bin
395x789 mm



Arqua fountain
770x450 mm



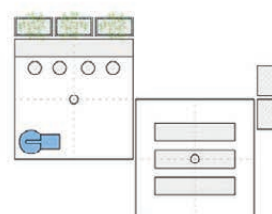
Frame planter
500x1000 mm



Site 1: Kogarah
Combination module B and A



Site 2: Mortdale
Combination module D and C



Site 3: Hurstville
Combination module C and A

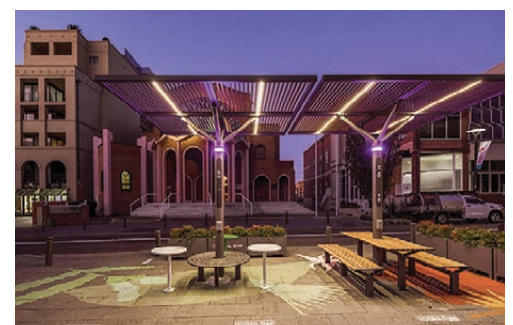


Fig. 7 | ChillOUT Hub modular system responds to the needs of different communities and sites (credit: I. Fabbri, based on Smart Social Spaces project scheme).

Fig. 8 | ChillOUT Hub in Kogarah, New South Wales (credit: Street Furniture Australia).



Fig. 9 | E-Lounge multifunctional bench with the triple charging role for electric bikes, smartphones, and people sitting down to rest (credit: Lanzillo & partners).

The recent diffusion in the metropolitan context of electric-powered private transportation, and the consequent proliferation of vehicle management equipment (charging stations, solar e-bike sharing stations, interactive info points, etc.) further increases the complexity, and often the unevenness, of urban space. It is in this context that Design can make a considerable contribution to the definition of sustainable solutions at the system level, i.e., as an integrated set of services-products-communication (Camplone, 2019) in response to a threefold need: to encourage sustainable mobility, to enrich the experience of walking, cycling or standing outdoors, and to reorder the set of small urban objects in public space.

In light of these considerations, the text illustrates the experience conducted in Ferrara related to the project of modular urban structures concentrating multiple services, also promoting electric micromobility, patented within the European research project Air Break. First, the contribution frames the phenomenon of the diffusion of electric vehicles in the city and the consequent evolution of urban objects to support the new means of transport, highlighting the elements of modularity peculiar to such case studies; then the objectives, compositional and modular order choices and the contributions of the co-design process that led to the Smart Hubs proposal are illustrated. This contribution concludes with a reflection on future developments and initial results gathered from the ongoing experimentation.

The research is in the field of 'product design', while at the same time looking with interest at urban design strategies for redesigning more attractive and safer public spaces, including through building more aware and participatory communities on such a complex issue as air quality. Therefore, it is believed that the text may be of interest to researchers pertaining to the multiple disciplines of design, engaged in key issues such as innovative service design, public space design and management, and sustainable development; the paper is also aimed at public institutions, mobility agencies and multi-service companies, as well as tourism and sports promotion bodies, and all citizens, as prosumers – producers and consumers – of air pollution.

Electric micromobility systems and furnishings | E-bikes, electric scooters and tricycles, segways, and hoverboards have revolutionised the way people get around the city in recent years, making it more comfortable, easier, and at the same time

sustainable and economical. Lightweight electric-powered vehicles also offer new opportunities for people with reduced mobility, and the prospect of being able to reach greater distances independently in less time; when compared with traditional models, pedal-assisted bicycles make it easier to overcome uneven terrain while providing a healthy, low-impact form of exercise.

Initially considered a passing fad, micromobility continues to grow: according to the Bicycle Ecosystem Report published by Banca Ifis and Marketwatch PMI (2021), industry players expect to reach 17 million e-bikes in 2030, surpassing the sale of muscle bikes. In Italy, the sale of e-bikes from 2015 to 2020 has even increased fivefold, and the market for electric scooters is also growing, to whose diffusion in Italy from 2020 the bonus provided by the Rilancio decree has contributed massively.

Ownership or medium- to long-term or single-ride rental represent options related to the type of electric vehicle one needs: the Boston Consulting Group (Lang et alii, 2022) estimated that while for electric bikes, rental and sharing still represent globally negligible revenue compared to purchase, for electric scooters, sharing is already worth twice as much (Fig. 2).

Also transforming in relation to this new mobility, in addition to the Highway Code, has been the physical interface of the service with neighbourhoods, where there is an increasing presence of installations and street elements, often extremely varied in terms of aesthetics and technological equipment, sometimes uneven within the urban landscape. Moreover, where to park electric scooters is a crucial issue to which conventional urban design does not always provide adequate answers, while microvehicle parking spaces could integrate with other elements (such as charging station, information kiosk, vegetation, and shelters) and offer a wider range of services (Tan and Tamminga, 2020).

New urban objects dedicated to electric micromobility can be traced to three recurring families of products, with incremental level of complexity: vertically developed charging stations, covered shelters, and multifunctional furniture. The first group includes elements such as the Clorofilla Power e-bike assistance and charging station (Fig. 3), produced by Cesena-based Buratti Meccanica and winner of the prestigious 2020 Design & Innovation Award for the Tourism category; the module is represented by a hollow cylinder 150 cm high, welded on a plate equipped with a foot pump, on which are grafted increasable and customisable services: two rubberised arms to hang any type of bike, schuko sockets at different heights and tools for the resolution of the most common mechanical failures.

Other relevant case studies fall into this first family, such as the concept developed by Entwurfreich (Fig. 4), whose modular construction allows for several variations: slotted pole for safe parking of classic bicycles and charging column for e-bikes, with or without upper light integration. Douglas Copland's V-Pole (Fig. 5), on the other hand, combines technology and public art; in a single 3.8-meter-high element equipped for street lighting, wi-fi hot spots, charging outlets, a vehicular parking control device, and other functions that can be implemented with LEGO brick logic are concentrated; in this case the modularity criterion is in-

tionally employed to reduce the visual 'clutter' brought about by the co-presence of different services.

Products attributable to the second group are essentially characterised by roofs that integrate photovoltaic modules to power electric mobility with equally sustainable energy. E-move Charging Station (Fig. 6) is a prototype designed by Valentin Runggaldier in 2009 for the City of Bolzano: the high inclination of the metal structure, reminiscent of a miniature gas station, optimises solar radiation on the photovoltaic panels while the outer side of the canopy features a seat made of water-repellent material that allows passersby to take a break and possibly recharge their smartphones.

Finally, multifunctional furniture includes those urban objects that may vary in scale, but share the dual goals of offering additional services to the electrically driven user and creating a 'smart island' for leisure and work (Marano, 2019). An interesting example is ChillOut Hub (developed as part of the Smart Social Spaces project, a collaboration between Georges River Council, Street Furniture Australia, University of New South Wales, and University of Sydney): the modular system, which creates connected, flexible, and shaded gathering points, is not a service specifically designed for electric mobility, but in its various configurations accommodates its needs. Each station consists of a modular tree-like structure, street furniture elements, and integrated IoT devices that can monitor the number of users, service usage time, and microclimate (Fig. 7). ChillOut Hub won the prestigious Australian Good Design Award 2022, gold-level, in the category of product design, commerce and industry (Fig. 8).

Another award-winning multifunctional piece of furniture is Repower's E-Lounge technology bench, designed by Lanzillo&Partners and awarded the ADI Compasso d'Oro in 2020. E-Lounge offers a charging service for e-bikes and devices such as tablets and smartphones, but also an urban seat with integrated rack, Wi-Fi and lighting (Fig. 9). The study on the state-of-the-art furnishings dedicated to electric micromobility suggests that an even more pronounced modular approach should be adopted in the project, both for greater versatility of the service and to experiment with further possibilities of aggregating different urban endowments into a single artefact in order to improve the ergonomic and aesthetic properties of open spaces (Dembich et alii, 2020).

Research background and objectives | The modular urban elements that are the subject of this contribution were developed as part of Air Break, a project funded by the European Urban Innovative Actions program with a financial coverage of 5 million euros, 80 percent of which is supported by the European Union, and coordinated by the Municipality of Ferrara together with the University of Ferrara, Sipro Ferrara, Politecnico di Milano, Fondazione Bruno Kessler, Dedagroup Public Services srl, LabService Analytica and HERA Spa.

Air Break's goals are to reduce environmental pollution levels by 25 percent in three years in specific critical areas of Ferrara, improve the well-being and safety of commuters, and provide real-time reporting of air quality. The project started in the fall of 2020, adopting two distinct but integrated approaches from the outset: the implementa-

tion of physical interventions (infrastructure related to mobility, greenery, urban equipment, and sensor technology) and community involvement through co-creation activities, participatory monitoring of air quality, and strategies to incentivise environmentally friendly behaviours.

Numerous researches, including the trial conducted between 2018 and 2019 in Turin as part of the Innovation for Change program, show how indeed active participation in air monitoring is an important driver for spreading awareness on this issue (Vrenna and Crétier and Landén, 2019) and ensuring that measures to reduce pollution levels are more effective. COMPAIR, for example, is a project launched in 2021 by ECSA (European Citizen Science Association), which incentivises the use of digital sensors for air quality monitoring by citizens in five European cities (Athens, Berlin, Sofia, Plovdiv, and Flanders region) and promotes the co-design of sustainable policies and behaviours to improve air quality.²

The European VARCITIES project also takes a participatory approach to transforming pilot spaces into safe, accessible and healthy places; in the Maltese city of Gzira, an experiment is underway along the busy Rue D'Argens aimed at reducing air pollution through three combined actions involving citizens: increasing green areas, home installation of sensors for environmental analysis and redesigning play spaces at school structures.³

Also of great interest is the device developed by Italy's FAE Technology with the Senseable City Lab at the Massachusetts Institute of Technology in Boston as part of City Scanner, a project that transforms cars into mobile sensor stations. With the Flatburn detector, every citizen can measure local air pollution, identify its sources and, ideally, help reduce it⁴, while not offering a new product or service that incentivises a change in mobility habits.

Similar to the aforementioned projects, Air Break intercepts the various objectives of current policies to prevent or reduce the harmful effects of air pollution on human health and the environment, such as Directive 2008/50/EC of the European Parliament⁵, the recommendations issued by the EEA with Report 24/2018⁶, the Italian Decree Law no. 155/2010⁷ and, at the local level, the Integrated Regional Air Plan (PAIR 2020)⁸, the Integrated Regional Transportation Plan (PRIT2025)⁹, which aims to achieve 20 percent of mobility by bicycle by 2025, and Ferrara's Sustainable Urban Mobility Plan (SUMP)¹⁰ (Verga, 2021).

Smart Hubs: product modularity | Smart Hubs have been designed and patented by HERA Spa with the Next City Lab research group (Architects Gabriele Lelli and Ilaria Fabbri), starting from previous experiments in urban services conducted for the multi-utility by the same Research Team afferent to the Department of Architecture of Ferrara. Smart Hub is, first of all, a data collection point of the city's metabolism, a physical support to house and protect a system of sensors that monitor environmental quality, safety and urban flows; secondly, it is a multifunctional urban element (of the 'all-in-one solution' type) that, in a footprint of about 16 square meters in the basic version, concentrates numerous services, starting with a charging and parking system for small electric vehicles, and further customisable functions.

	charge station	bench	parcel locker	power plugs	standing desk	PV glass panels	bike repair kit	automated external defibrillator	SOS device	RGB led lights	Wi-Fi	security cameras	sensors	waste collection
	●	●	×	●	●	●	×	×	×	●	●	●	●	×
	●	×	×	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×
	●	×	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×
	●	×	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	×	●	×	●	●	●	×	×	×	●	●	●	●	×

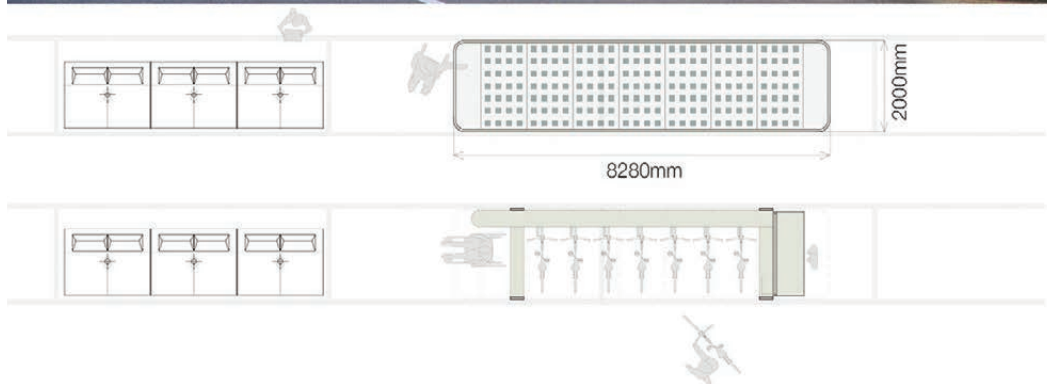


Fig. 10 | Smart Hub different configurations within the same basic structural unit (credit: I. Fabbri).

Fig. 11 | Smart Hub, in its base version, fits two parallel parking spots, including the clear floor space to be properly maintained and used (credit: I. Fabbri).

The guiding criteria of the project were multi-functionality, flexibility of use, reproducibility, transportability, compactness, and capability of being improved in functionality, categories historically more typical of the American design and market (Dellapiana, 2022), and which today, in relation to the transformation of urban furniture offer the possibility of rethinking and reorganising the galaxy of elements that populate the urban landscape.

Modular design assumes that the parts of an object are independent, and can be used independently but also combined with each other; this approach allows the interaction between different components of a product to be modified – to accommodate new usage needs or repair a single element, for example – without affecting the basic design.

At the level of street furniture, this criterion is most frequently applied to seating and bench systems, as highlighted by Hassanein (2017) and Pryanov (2017), among others, mainly to create different configurations and encourage interaction, or to temporary kiosks (Dembich et alii, 2020), for faster assembly and dismantling. The theme of modularity has permeated, in various facets, all stages of the Smart Hubs experimentation process, from the design of the object and its services to its integration into neighbourhoods and the establishment of a physical and virtual urban network. Each Smart Hub comprises a structural unit, one or more specialised functional units, and an IoT technological infrastructure.

The structural unit consists of a painted, self-supporting metal frame that does not require foundations or work on the existing pavement, to simplify installation and allow for possible relocation in case of changing urban needs. The frame consists of rectangular-section steel pillars, with a commercial size of 300 x 50 mm, whose internal cavity is exploited for the passage of cables; the box-shaped profiles support a roofing element with rounded corners, also with a rectangular section, on which photovoltaic glass panels are placed to contribute to the electrical needs of the services present. Below the cover, a wired bar for charging small vehicles serves both as a stiffener for the vertical boxes and as a fastening surface for the racks. The structure is a skeleton that can accommodate

several specialised functional units, true progressively implementable modules that offer multiple assembly possibilities depending on the required services and installation sites, thus allowing a high degree of customisation: automated station for delivery and pickup of packages by courier, cabinet with basic tools for small repairs, foot pump, outdoor defibrillator, communication system in case of emergency, work surface, sockets for powering electronic devices or for charging vehicles for people with motor disabilities: the co-presence and simultaneous use of the specialised functional units does not interfere with vehicle parking operations. Smart Hub is configured as a ‘modular piece of furniture for outdoor mobile’, a minimal and efficient organism ‘with adequate measures to perform all activities safely, saving time and energy’ (Bombaci, 2020; Fig. 10).

The Research Team also envisaged the possibility of transforming Smart Hub into a canopy for waiting for public transport, through the reconfiguration of the minimum structural unit and some functional components: without overhangs at the ends, the unit provides for the arrangement of the pillars on the two axes while the wired bar is replaced by a sheet metal fixed to the lower part of the vertical box-shaped profiles, which acts as a ballast for stability, and, by bending, as a shell to protect the technical compartment, as a support surface and as a seat. This additional prototype was installed in the Municipality of Castel Bolognese (RA) as part of specific research related to improving public transportation service in urban centres under 10,000 inhabitants.

At the compositional level, aesthetic values merge with functional character: the choice of constant 50 mm sections for pillars and roof element is graphic in nature and contributes to the lightness of the whole, together with the open corner solution. The upper, rounded profile creates a tray, an abstract body with the concrete role of protecting the vehicles below and housing the sensors. The different components fit together without ever covering the structure, which remains continuous and legible in the various combinations of modules and degrees of accessorisation.

The Smart Hub concept also interfaces with another parking module at the neighbourhood

scale, seamlessly integrating into most road contexts. In this case, the footprint of the structural unit and its functional space, when equipped with various components, fits within the dimensions of two standard parallel parking spaces, despite the contemporary yet discreet design of the object allowing for placement in larger public spaces. Furthermore, the research group has developed more elaborate versions that can occupy up to four parallel parking spaces, combining the electric vehicle charging station with other technologically equipped and strategically positioned services, such as an innovative waste collection system (Fig. 11).

Lastly, the technological infrastructure: Smart Hub houses a router for wi-fi, cameras for video surveillance, an RGB LED strip, and the weather sensing sensor kit, which enables the linking of urban travel information (such as electric vehicle or public transport use) and environmental data. In the essay titled Healthy Transportation – A Question of Mobility or Accessibility Andrew Mondschlein (2018) points out that most research on promoting healthy mobility assesses only the frequency and distance of non-motorized travel, when it is critical to measure the travel experience as well, both in terms of the quality of the trip and the health resulting from the trip.

Today, technology makes it easy, and relatively inexpensive, to collect information on noise and air pollution and other factors that affect user comfort such as temperature, light, and humidity; the installation of these sensors at sustainable mobility infrastructure, when aggregated with service use data, fosters a better understanding of the correlation between travel choices and environmental conditions. In addition, the concentration of multiple services for sustainable and soft mobility in the same artefact can offer more motivation to travel by foot or bicycle, enhancing the relational properties of proximity (Manzini, 2021) by generating sociality and more opportunities for people to meet and interact.

Methodology and phases of the research | The

research adopts a phased methodological path that allows the experimentation to be repeated in other contexts. The backbone of the entire project is the community’s involvement, first and foremost through a needs analysis aimed at selecting services to be included in urban neighbourhood settings. The most suitable functional endowments were identified and selected thanks to the input of citizens, economic operators and local interest groups through a co-creation process led by the Milan Polytechnic. The participatory workshops took place mainly online, between October 2020 and October 2021, through Google Meet and the Miro virtual whiteboard (Fig. 12). Sustainability thus became a behavioural paradigm, merging the hard component of design, more related to morphology and materials, and the soft component, of relationships, sharing, and social innovation (Fagnoni and Olivastri, 2019).

The modular logic that guided the product’s design not only facilitates production and future maintenance, but even before that, it allowed the design of context-specific solutions, albeit employing the same basic structure. Having defined the demand framework and the services to be included, the general design of the prototype and

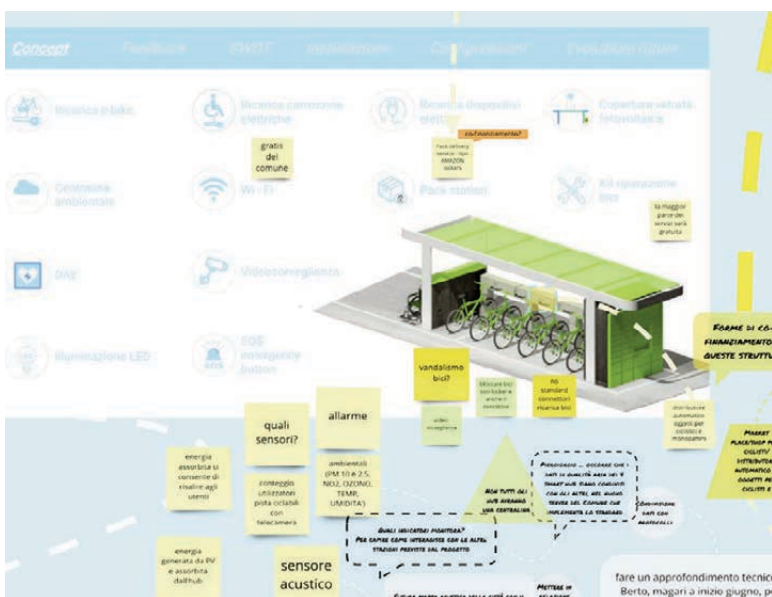


Fig. 12 | A screenshot from Miro Board used during an online co-creation workshop (credit: Politecnico di Milano).

the way in which the components would be inserted were undertaken; at the same time, the phase of identifying specific urban objectives began. Also for the choice of the different contexts for the installation of the Smart Hubs, the Research Group, together with HERA Spa and the Technical Office of the Municipality of Ferrara, made use of the suggestions of the local community, collected with the help of unstructured interviews and on-site observations; thus, the points of convergence of greater intensity of pedestrian and bicycle flows, the open spaces and small squares in front of buildings open to the public without yet a clear functional identity but with an aggregation potential to be enhanced were identified (Fig. 13).

In terms of e-mobility, the HUBs in the four pilot districts meet different needs: short stops and recharges during the course of recreational activities, which are particularly relevant along the Darsena (Fig. 14), daytime long-stay parking lots near the train station (Fig. 15) and the Technopole (Fig. 16), and both daytime and night-time long-stay stops in front of the municipal swimming pool in the Corti di Medoro residential area (Fig. 17).

Once the configuration of each specific HUB was defined and validated, the economic evaluation of the production of the system and the setting up of the chosen urban point was undertaken and then the scouting phase of companies for prototyping began. Regarding the cost of making the prototypes, it is preliminarily pointed out that a production on larger numbers will result in a reduction of about 50 percent compared to the amounts needed for the first experiments; the basic structure, without foundations, presents a similar, but competitive cost (indicatively 5 percent less), compared to the sum of the cost of standard shelters of the same size, with the amounts for the execution of the foundation, with its connections and the restoration of the existing pavement.

In addition to the standard solution, however, the Smart Hub's structural unit is ameliorative; it is hollow and can be wired, an essential feature for incremental insertion of services, while the canopy can be covered with either glazed photovoltaic panels or opaque panels. The cost of the fully accessorized Smart Hub is also less than the sum of the amounts needed to install a canopy and as many endowments and sensors considered individually in the city, which in any case need adequate support, without considering the greater use of public space that the latter case requires.

Subsequent stages of the research contemplated verification of the prototype's functionality in a controlled environment (at the workshop selected for implementation), resulting in a review of the design and insertion of the modules, including through the involvement of a target audience. This was followed by installation and testing at the selected locations, commissioning, and service management planning. Each Smart Hub is specifically designed to last for a long time in the public space and ensure easy maintenance, thanks to the possibility of replacement of equipment by components, on the one hand fostering the perception of greater care for the public good, and on the other encouraging greater respect for it. Finally, a phase of verification of the results obtained from the trial, user and operator satisfaction, and a study to evaluate a possible expansion of the HUB network in the city was activated, with an incremental project logic.

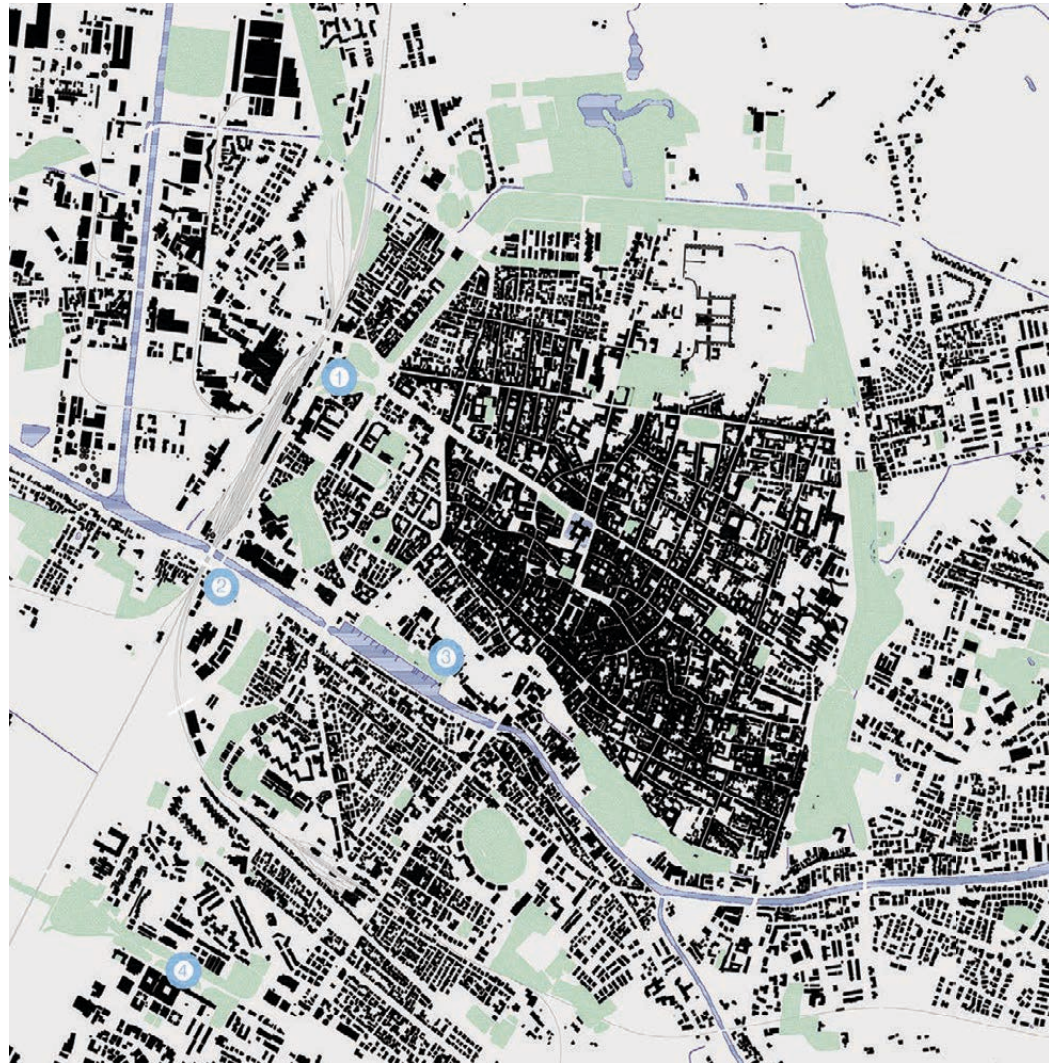


Fig. 13 | The selected demo sites where Smart Hubs are installed: 1) Rail station; 2) Ferrara Technopole; 3) Darsena; 4) Corti di Medoro (credit: I. Fabbri).

Results of the trial and future developments | To date, Air Break has entered its final phase, without significant delays or changes from the original project, despite the impact of the pandemic on the first phase, rising prices, and difficulties in sourcing some materials. The activation of a network of 14 environmental control units, 4 of them on board Smart Hubs, and other chemical-olfactory sensors was completed in March 2023: the data collected returned a 10 percent reduction in air pollutants and 20 percent reduction in deposited PM10 compared to the year 2019, thanks in part to the connection of the bike path network and the planting of 2,000 trees. Most importantly, Air Break involved more than 3,000 people, including businesses, interest groups, residents and commuters who took part in the various awareness, monitoring and co-creation initiatives. Although the experimentation is still in progress and the dissemination in the Ferrara territory is, for now, limited to the four pilot neighbourhoods, this experience provides a contribution to theoretical and applied research, being replicable in other contexts as well, thanks to the low cost of implementation, the easily assembled and transportable structure, and the gradually implementable services (Lelli and Fabbri, 2021).

Because of the Ferrara Administration's expressed willingness to extend the experimental

infrastructure to the entire municipal area and the interest shown by other municipalities, the project will address all the critical issues and weaknesses that emerged during the testing phase, from the need to optimise some structural connections to the replacement of anti-vandalism and theft-resistant finishing elements of some bike repair tools, which have been attached to the structure with stronger hooks. However, it should be noted that vandalism occurred before the activation of the video surveillance network on board the Smart Hubs, after which similar phenomena did not recur.

Field observations and interviews with users of the HUBs are still ongoing, which will help improve the user experience and increase service utilisation. The findings so far suggest that, beyond the object's design, the proposal's success depends on the management of services and the choice of location. The management of all accessories is crucial: the system is effective if all its components are functioning and networked (with the possibility of remote control of environmental and acoustic data, video surveillance, lighting dimmers, etc.). The choice of location for the HUB must also be very careful; it must intercept a truly strategic and visible point of passage and parking to ensure its use over time; of course, as highlighted above, the choice of equipment must also be appropriate. Further versions will also see Smart Hubs



Fig. 14 | Smart Hub in the green area between Darsena Street and Burana Canal, recently renovated by the Municipality of Ferrara (credit: F. Mantovani).

Fig. 15 | Smart Hub in front of Ferrara railway station (credit: F. Mantovani).

Fig. 16 | Smart Hub at Ferrara Technopole, close to cycle lanes and nodal roads (credit: F. Mantovani).

Fig. 17 | Smart Hub prototype along the bicycle lane in Corti di Medoro neighbourhood, near shops, student residences and a municipal swimming pool (credit: F. Mantovani).

Fig. 18 | Tentative visualisation of a Smart Hub in the green area along Darsena Street, experimenting with the fruitful combination of smart drinking fountain, public seating and the multi-functional structure dedicated to electrical mobility (credit: Next City Lab UniFe).

Fig. 19 | Modular approach allows to change different parts of the product: as requirements change, individual parts can change as well without affecting the basic design; if individual elements are damaged, they can be easily replaced (credit: F. Mantovani).

being paired with drinking water delivery systems, a service that is particularly synergistic with the theme of soft mobility (Fig. 18).

In conclusion, it is possible to say that Smart Hub is able to meet the needs of enriching services in public space and the supply of charging for small electric vehicles and monitoring air qual-

ity. The design of an open, modular system that can be implemented according to the specific needs of the neighbourhood, with different possibilities for customisation and assembly (Fig. 19), has made it possible to amalgamate different urban services into a single product, rearranging those elements that often accumulate unevenly in the out-

door environment, and to respond, without the costs of a custom-made product, to the needs expressed or unexpressed by users, the local community and the territory.

Acknowledgements

The prototype charging point for electric bicycles and other services called PuntoNet Bike (patent holders: E. Piraccini, S. Allegra, G. Lelli, I. Fabbri and W. Nicolino) was optimised and developed in the Smart Hub version as part of the Air Break project by the Hera Group (E. Piraccini, S. Allegra, G. Mengozzi and P. Mangifesta) in collaboration with architects G. Lelli and I. Fabbri.

Notes

1) More information on 'Italy's long-term strategy on greenhouse gas emission reduction' can be found at: mase.gov.it/sites/default/files/lts_january_2021.pdf [Accessed 10 October 2023].

2) More information can be found at: ecsa.citizen-science.net/cases/compare-together-for-a-better-air/ [Accessed 10 October 2023].

3) More information can be found at: varcities.eu/pilot-cities/gzira-malta/ [Accessed 10 October 2023].

4) More information can be found at: news.mit.edu/2023/low-cost-device-can-measure-air-pollution-anywhere-0316 [Accessed 10 October 2023].

5) More information can be found at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0050 [Accessed 10 October 2023].

6) More information can be found at: eea.europa.eu/publications/europes-urban-air-quality [Accessed 10 October 2023].

7) More information can be found at: gazzettaufficiale.it/eli/id/2010/09/15/010G0177/sg [Accessed October 10 2023].

8) More information can be found at: ambiente.regione.emilia-romagna.it/en/aria/temi/pair2020/documents-of-the-approved-plan/pair-2020-documents-of-the-approved-plan [Accessed 10 October 2023].

9) More information can be found at: mobilita.regione.emilia-romagna.it/prit-regional-integrated-transportation-plan/sections/prit-2025-elaborati-tecnici [Accessed 10 October 2023].

10) More information can be found at: comune.fe.it/b/25858/pums-urban-plan-of-sustainable-mobility [Accessed 10 October 2023].

References

Banca Ifis and Marketwatch PMI (2021), *Ecosistema della bicicletta*. [Online] Available at: bancaifis.it/app/uploads/2021/09/Market-Watch_Ecosistema-della-bicicletta.pdf [Accessed 10 October 2023].

Bombaci, G. (2020), "Il tempo e lo spazio della convivenza con la Covid-19", in *Il Tascabile*, 04/05/2020. [Online] Available at: iltascabile.com/linguaggi/tempo-spazio-covid-19/ [Accessed 10 October 2023].

Camplone, S. (ed.) (2019), *Bike design per la mobilità sostenibile – Riflessioni tematiche e percorsi di ricerca*, Sala editori, Pescara.

Comune di Milano and Agenzia Mobilità Ambiente e Territorio (2021), *Spazio pubblico – Linee guida di progettazione*. [Online] Available at: bit.ly/SpazioPubblicoComuneMilano [Accessed 10 October 2023].

Dellapiana, E. (2022), *Il design e l'invenzione del Made in Italy*, Einaudi, Torino.

Dembich, N. D., Streltsov, A. V., Zyrina M. A. and Marchenko, A. (2020), "Modular system-based urban equipment design", in *IOP Conference Series | Materials Science and Engineering*, vol. 944, article 012007, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1757-899X/944/1/012007 [Accessed 10 October 2023].

EEA – European Environmental Agency (2023), *Air pollution in Europe – 2023 reporting status under the National Emission reduction Commitments Directive*, EEA Briefing. [Online] Available at: eea.europa.eu/publications/national-emission-reduction-commitments-directive-2023 [Accessed 10 October 2023].

Fagnoni, R. and Olivastrì, C. (2019), "Hardesign vs Soft-design", in *Agathon | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 145-152. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5162019 [Accessed 10 October 2023].

Gianfrate, V. and Longo, D. (2018), *Urban micro-design – Tecnologie integrate, adattabilità e qualità degli spazi pubblici*, FrancoAngeli, Milano.

Hassanein, H. (2017), "Smart Technical Street Furniture Design – Case study of 'New Cairo Administrative Capital'", in *The Academic Research Community Publication*, vol. 1, issue 1, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.21625/archive.v1i1.124 [Accessed 10 October 2023].

Hematian, H. and Ranjbar, E. (2022) "Evaluating urban public spaces from mental health point of view – Comparing pedestrian and car-dominated streets", in *Journal of Transport & Health*, vol. 27, article 101532, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jth.2022.101532 [Accessed 10 October 2023].

Lang, N., Schellong, D., Hagenmaier, M., Herrmann, A. and Hohenreuther, M. (2022), *Putting Micromobility at the Center of Urban Mobility*, Boston Consulting Group. [Online] Available at: mkt-bcg-com-public-pdfs.s3.amazonaws.com/prod/the-future-of-urban-mobility.pdf [Accessed 10 October 2023].

Lelli, G. and Fabbri, I. (2021), "Nuovi oggetti che abitano lo spazio pubblico", in *MD Journal*, issue 11, pp. 90-107. [Online] Available at: mdj.materialdesign.it/index.php/mdj/article/view/208/215 [Accessed 10 October 2023].

Magnago Lampugnani, V. (2021), *Frammenti Urbani – I piccoli oggetti che raccontano le città*, Bollati Boringhieri, Torino.

Manzini, E. (2021), *Abitare la prossimità – Idee per la città dei 15 minuti*, Egea, Milano.

Marano, A. (2019), "Product design per la bike mobility", in Camplone, S. (ed.), *Bike design per la mobilità sostenibile – Riflessioni tematiche e percorsi di ricerca*, Sala editori, Pescara, pp. 49-55.

Minutolo, A., Frasso, C. and Pandolfo, E. (2023), *Mal' Aria di Città – Cambio di passo cercasi*, Legambiente. [Online] Available at: legambiente.it/wp-content/uploads/2021/11/Rapporto_Malaria_2023.pdf [Accessed 10 October 2023].

Mondschein, A. (2018), "Healthy Transportation – A question of mobility or accessibility", in Beatley, T., Jones, C. and Rainey, R. (eds), *Healthy Environments, Healing Spaces – Practices and Directions in Health, Planning and Design*, University of Virginia Press, pp. 11-30. [Online] Available at: doi.org/10.2307/j.ctv8d5sgp.4 [Accessed 10 October 2023].

Ordine degli Architetti di Milano, Commissione Paesaggio del Comune di Milano, Direzione Centrale Tecnica and Settore Tecnico Infrastrutture e Arredo Urbano (2015), *Ur-*

ban Care – Dotazioni urbane e cura dello Spazio Pubblico, Ordine Architetti P.P.C. di Milano, Milano.

Prvanov, S. (2017), *Street Furniture in High-Density Urban Areas – Geometry, Ergonomic, and CNC Production*, Research Study from the American University of Kurdistan. [Online] Available at: doi.org/10.13140/RG.2.2.20396.26242/1 [Accessed 10 October 2023].

Sennett, R. (2020), *Costruire e abitare – Etica per la città*, Feltrinelli, Milano.

Tan, S. and Tamminga, K. (2020), "A Vision for Urban Micromobility – From Current Streetscape to City of the Future", in Nathanail, E. G., Adamos, G. and Karakikes, I. (eds), *Advances in Mobility-as-a-Service Systems – Proceedings of 5th Conference on Sustainable Urban Mobility, Virtual – CSUM2020, June 17-19, 2020, Greece*, Springer, Cham, pp. 158-167. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-61075-3_16 [Accessed 10 October 2023].

Verga, P. L. (2021), "Air Break Journal Nr. 1", in *UIA Initiative*, 10/12/2021. [Online] Available at: uia-initiative.eu/en/news/air-break-journal-nr-1 [Accessed 10 October 2023].

Vrenna, M., Crétier, M. and Landén, S. N. (2019) "Monitoraggio partecipativo dell'aria urbana con apparecchi open source | Participative urban air quality monitoring using open source devices", in *Agathon | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 167-174. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5192019 [Accessed 10 October 2023].

WHO – World Health Organization (2022), *Protecting health through ambient air quality management – A resource package for the WHO European Region*. [Online] Available at: apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/366687/WHO-EURO-2023-6898-46664-67857-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Accessed 10 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	10 September 2023
Revised	04 October 2023
Accepted	18 October 2023
Published	31 December 2023

DESIGN LITICO E MANIFATTURA ADDITIVA

Un connubio possibile per l'economia circolare

LITHIC DESIGN AND ADDITIVE MANUFACTURING

A feasible partnership for the circular economy

Katia Gasparini

ABSTRACT

Il contributo riporta gli esiti di una ricerca il cui obiettivo è esplicitare il valore e il ruolo delle tecnologie emergenti nell'architettura e nel design, con particolare riferimento alla manifattura additiva e alla tecnologia multimateriale per la produzione di componenti modulari e sostenibili mediante il riciclo dei rifiuti della pietra. Le ricerche nei settori dell'architettura, dell'ingegneria dei materiali e dell'ambiente sono state messe a confronto con le sperimentazioni condotte nella realizzazione di prodotti con materiale di origine lapidea, realizzati con tecnologie di manifattura additiva e con la più tradizionale manifattura sottrattiva. Le potenzialità della manifattura additiva tramite il recupero di scarti lapidei si esplicitano in prodotti e componenti visivamente e funzionalmente innovativi, poliedrici e ambientalmente compatibili.

This paper presents the results of a research aimed at elucidating the value and role of emerging technologies in architecture and design, with a particular focus on additive manufacturing and multi-material technology for the production of modular and sustainable components through the recycling of stone waste. Research in the fields of architecture, materials engineering, and the environment has been compared with experiments conducted in creating products using stone-derived material manufactured through both additive and traditional subtractive processes. The potential of additive manufacturing through the recovery of stone waste is evident in visually and functionally innovative, versatile, and environmentally friendly products and components.

KEYWORDS

tecnologia multi-materiale, design litico, scarti lapidei, manifattura additiva, stampa 3D

multi-material technology, lithic design, stone waste, additive manufacturing, 3D printing



Katia Gasparini is an Architect with a PhD, currently working as a Researcher at the Department of Architecture, Design and Urban Planning, University of Sassari (Italy). She carries out research activities mainly in the fields of technological innovation (hyper-technological facades) and environmental enhancement. Research outcomes are published in monographs and articles. E-mail: kgasparini@uniss.it

I cambiamenti climatici e taluni eventi naturali catastrofici che si sono verificati nell'ultimo ventennio hanno contribuito alla diffusione di una maggiore sensibilità ambientale, soprattutto rispetto allo sfruttamento delle risorse naturali che dalla prima Rivoluzione Industriale erano considerate pressoché illimitate. I settori economici più critici in tal senso sono quelli delle costruzioni e delle attività estrattive, che complessivamente producono il 65% dei rifiuti a scala europea (EEA, 2023). Tuttavia dopo gli anni del boom economico e le prime crisi energetiche si è sviluppata una maggiore coscienza rispetto alla limitata disponibilità delle risorse naturali, da un lato riscontrando l'incompatibilità tra le attività estrattive e la qualità ambientale (Monsù Scolaro, 2017), dall'altro con la produzione di manufatti che impiegano materiale di scarto (Baratta et alii, 2023) o a base biologica (Violano, Cannaviello and Del Prete, 2021).

In questo scenario si concretizza la necessità di un rinnovamento progettuale e produttivo volto al reintegro del materiale di scarto nel ciclo produttivo (Baratta, 2021) in un'ottica di flessibilità e personalizzazione del prodotto; per raggiungere l'obiettivo anche nel settore lapideo è auspicabile lo sviluppo della produzione di componenti edilizi da sfrido in una prospettiva di circolarità (Di Roma, Scarcelli and Minenna, 2019). Questo approccio condurrebbe in prima battuta a una drastica riduzione di residui e informi in cave e discariche e, con un cambiamento di paradigma progettuale, alla riduzione e al controllo dell'attività estrattiva. La digitalizzazione della progettazione e della produzione oggi può altresì incrementare la progettazione di sistemi e processi veloci ed economici per la produzione di componenti edilizi, sistemi costruttivi e architetture a basso impatto ambientale, focalizzate sugli specifici bisogni dei singoli utenti (Weinstein, 2020).

Obiettivo della ricerca presentata nell'articolo è esplorare nuove strategie produttive di simbiosi industriale per il riutilizzo degli scarti di cava, finalizzati alla produzione di componenti per l'edilizia secondo i principi di sostenibilità, resilienza e human-centric design sanciti dall'Unione Europea (European Commission et alii, 2021). Il contributo indaga le potenzialità di un processo produttivo alternativo e complementare alla manifattura sottrattiva per i materiali lapidei, al fine di ridurre l'impatto ambientale derivante dallo sfruttamento delle cave e riutilizzare interamente gli scarti sia in estrazione che in lavorazione.

Per una valutazione oggettiva sarà analizzato un progetto realizzato sia con Manifattura Sottrattiva (MS) che con Manifattura Additiva (MA), per comparare i dati di produzione in termini temporali, ambientali e formali. Il potenziale della MA per la realizzazione di componenti e prodotti personalizzati potrebbe soddisfare le esigenze ambientali e produttive contemporanee in modo economico e senza sprechi; in particolare la produzione di componenti da polvere lapidea con il metodo della stampa 3D può consentire il riutilizzo del 100% degli scarti, con una importante flessibilità in termini di forma, funzione e circolarità.

L'articolo è strutturato in tre parti: la prima mette in connessione il contesto culturale e produttivo all'interno del quale si colloca la ricerca; la seconda analizza lo stato dell'arte in merito all'impiego della MA nel settore delle costruzioni; la terza descrive gli esiti di un lavoro di ricerca e sviluppo per

la realizzazione di alcuni componenti in materiale lapideo da scavo e da riciclo tramite MS e MA. In particolare, per l'analisi dello stato dell'arte, sono state esaminate ricerche in corso e pubblicate sull'impiego della MA in architettura per la realizzazione di moduli abitativi con materiali e tecnologie di stampa 3D.

È stata quindi approfondita la tecnologia Binder Jetting (BJ) con polvere lapidea da riciclo. Il caso studio è stato realizzato all'interno di una collaborazione di ricerca e sviluppo fra tre realtà diverse: l'azienda Desamanera srl, produttrice di stampanti 3D di grandi dimensioni (in collaborazione con Università degli Studi di Padova) per il modello realizzato con tecnologia BJ; l'Accademia di Belle Arti di Verona¹ per la parte progettuale; la Scuola del Marmo di Verona per la produzione dello stesso elemento con MS. Il metodo di lavoro e analisi si è basato sull'osservazione empirica di dati e risultati che forniscono un indicatore rispetto alle potenzialità della tecnologia BJ in architettura e design, ma i test dovranno essere approfonditi e perfezionati su casi studio di dimensioni diverse.

Il contesto culturale e produttivo | Da quando la progettazione parametrica e la stampa 3D di grande formato sono entrati prepotentemente in tutti i settori, compreso quello delle costruzioni, si sono ampliate drasticamente le variabili formali e la portata di ciò che si può costruire, riducendo il tempo e gli errori dovuti al passaggio di informazioni (Sposito and Scalisi, 2017). Da alcuni anni assistiamo alla realizzazione di moduli abitativi prodotti con la tecnica della manifattura additiva, mentre inizialmente si producevano componenti modulari di piccole dimensioni, riproducibili in poco tempo e con materiali di sintesi. Con il perfezionamento della tecnologia sono aumentate le dimensioni delle macchine e si sono moltiplicati i materiali utilizzabili, passando dai materiali di sintesi alle miscele di materiali naturali come le terre, le polveri di marmo e le miscele di sale; contestualmente sono aumentate anche le dimensioni dei moduli, divenuti vere e proprie cellule abitative.

Di fatto oggi la MA può essere applicata al settore delle costruzioni in due modi: per produrre componenti modulari da assemblare in strutture più grandi o per stampare interi moduli abitativi (Sposito and Scalisi, 2017). In questo contesto, nel binomio progettazione parametrica / stampa 3D dei componenti, il concetto di 'modulo' assume una duplice valenza: non è solo un componente riproducibile, ma è anche un codice di comunicazione uomo-macchina, dove algoritmi ripetuti (per esempio i frattali) consentono la realizzazione, strato dopo strato, di oggetti tridimensionali dalle forme e texture più disparate.

Nel passaggio al digitale la progettazione è entrata in una dimensione in cui la geometria delle forme è generata da un modello matematico, basato su 'parametri': una semplice ripetizione, che utilizza regole storicamente note come Fibonacci e simili (Jabi, 2013). Il concetto di progettazione parametrica nasce nel secolo scorso e si riconduce agli studi di Luigi Moretti (1974a, 1974b) e Bruno De Finetti, Frei Otto e più recentemente in Zaha Hadid, Gregg Lynn, ONL e altri (Premier, 2017).

Con 60 anni di anticipo rispetto le attuali istanze progettuali, Moretti ha affrontato i temi legati alla forma e ai suoi processi generativi introdu-

cendo il concetto di 'modellazione matematica', antesignano della progettazione parametrica. Nel 1957 Moretti ha infatti fondato, insieme a Bruno De Finetti, l'Istituto per la Ricerca Matematica e operativa applicata all'Urbanistica (IRMoU), con il fine dichiarato di portare avanti gli studi sulla cosiddetta 'architettura parametrica' (Esposito De Vita, 2009). Il progetto, inteso come risultante di processi generativi che da Moretti si sono via via perfezionati digitalmente è quindi concepito come risultante di equilibri sistemici aperti verso il futuro (Ciribini, 1984).

Anche il lavoro di Frei Otto, considerato il padre delle tensostrutture, è stato influenzato dalla osservazione e imitazione delle strutture naturali; egli progettò strutture organiche grazie all'osservazione dei processi evolutivi che avvengono in natura e che trovano riscontro nei modelli matematici basati su parametri. In epoca più recente, Zaha Hadid è stata riconosciuta come interprete dell'architettura parametrica che ha saputo concretizzare in architetture dalle forme sia fluide che decostruite, mettendo a sistema la formazione accademica in matematica e quella in architettura. Nel XXI secolo lo sviluppo degli strumenti informatici ha quindi trasformato il progetto in un sistema complesso di interazioni e di aggregazioni successive di moduli tridimensionali geometrici che si uniscono formando strutture spaziali (Marcolli, 1978), fornendo ai progettisti gli strumenti per simulare la complessità osservata in natura e applicarla a scale diverse, contribuendo 'dal cucchiaino alla città, all'edificazione di una nuova cultura'² (Lidinger, 1986; Erlhoff, 1986).

Lo sviluppo parallelo delle tecnologie di stampa tridimensionale dell'ultimo ventennio ha dato un ulteriore impulso all'applicazione della progettazione parametrica, consentendo la realizzazione di moduli dalle forme fluide e complesse che con i sistemi costruttivi tradizionali richiederebbero tempi e costi di realizzazione notevoli; ciò ha favorito la sperimentazione di nuovi materiali di derivazione artificiale e naturale, ad esempio biomateriali e materiali da riciclo come gli scarti di cava.

La ricerca e introduzione di materiali alternativi e ad alto grado di innovazione anche nel settore lapideo è stata spinta negli ultimi anni da alcuni fattori determinanti: dalla riduzione delle risorse naturali alla maggiore sensibilità ambientale rispetto allo sfruttamento delle cave di pietra, fino all'aumento dei costi della materia prima. I processi estrattivi e produttivi che fino ad oggi hanno caratterizzato i prodotti lapidei presentano ancora un'alta percentuale di sfridi e informi, che per talune pietre è ragguardevole e ha ricadute ambientali importanti, sia sullo sfruttamento dei siti naturali che sullo smaltimento degli stessi.

Dai report sull'industria lapidea mondiale (Tab. 1) emerge che la produzione lorda di cava è più che raddoppiata in 15 anni (2003-2018) raggiungendo 313.000 tonnellate nel 2018; parimenti, al netto da scarti di estrazione e lavorazione, il totale netto lavorato e finito di prodotti di lapideo si è attestato a circa 90.000 tonnellate nel 2018. Per la precisione, ben il 71% del materiale si trasforma in scarto, in due fasi distinte: lo sfrido di estrazione costituisce il 51% mentre lo sfrido di lavorazione costituisce il 41% sulla quantità di produzione grezza (Italian Trade Agency, 2020, 2021; Montani, 2017). Nella Tabella 1 si evidenzia che in 15 anni la proporzione fra scavo e sfrido si

Year	Gross Quarrying	Quarrying Waste	Raw Production	Processing Waste	Processed Production
2003	153,750	78,750	75,000	30,750	44,250
2004	166,500	85,250	81,250	33,300	47,950
2005	174,750	89,500	85,250	34,950	50,300
2006	190,250	87,500	92,750	38,000	54,750
2007	212,000	108,500	103,500	42,500	61,000
2008	215,000	110,000	105,000	43,000	62,000
2009	213,750	100,250	104,500	42,850	61,650
2010	228,000	116,500	111,500	45,715	65,785
2011	237,200	121,200	116,000	47,560	68,440
2012	252,500	129,000	123,500	50,630	72,870
2013	265,800	135,800	130,000	53,300	76,700
2014	279,000	142,400	136,500	56,000	80,500
2015	286,200	146,200	140,000	57,400	82,600
2016	296,400	151,400	145,000	59,400	85,600
2017	310,700	158,700	152,000	62,300	89,700
2018	313,000	160,000	153,000	62,750	90,250

Tab. 1 | World Stone Industry: net production and waste ratio (tons data); waste materials destined for granules, powders and similar uses are included (credits: Italian Trade Agency, 2020, 2021; Montani, 2017).

Project	Year	Materials	Technology	Dimensions (m)	Days Hours
Tecla	2019	Raw local land, straw and rice	L.D.M	6.6 x 3.0	25 days 200 h
Future Pavilion	2016	Concrete, fiberglass, fiber-reinforced polymers	F.D.M.	36.0 x 6.0	17 days
EU Pavilion	2015	Biopolymers	F.D.M.	2.0 x 2.0 x 3.5	
Saltygloo	2013	Salt, polymers	F.D.M.		
Radiolaria Pavilion	2009	Sand or mineral powder, liquid binder	B.J.	3.0 x 3.0 x 3.0	

Tab. 2 | Case studies comparison.

è mantenuta costante, quindi è presumibile che non siano state attuate politiche ambientali e produttive che prevedano l'introduzione di nuove tecnologie di estrazione e lavorazione, in sinergia con strategie progettuali volte a minimizzare lo scarto. Ad oggi il processo produttivo prevalente nel settore lapideo è legato alla manifattura sottrattiva del CNC, una tecnica 'scultorea' che rimuove il materiale da un blocco di pietra e che ha contribuito a realizzare molti progetti complessi (Turunen, 2016). Tuttavia tale tecnica ha dei limiti legati all'aspetto formale dei prodotti (difficoltà a produrre forme cave e complesse) e alla produzione di una alta percentuale di sfrido. Le

attività di ricerca e sviluppo degli ultimi 15 anni negli ambiti del digitale e dell'ingegneria dei materiali hanno contribuito alla progressiva integrazione di alcuni processi MA anche nell'architettura e nel design.

Diversamente dalla MS la MA non spreca materiale e già da molti anni è utilizzata nel settore meccanico e del design di prodotto con diverse tecniche: se Fused Filament Fabrication (FFF), stereolitografia e bracci robotici sono le tecniche di produzione additiva più comuni quando sono stampati oggetti legati all'architettura su larga scala³, il Binder Jetting (BJ) prevale nel comparto dei ceramici, mentre Direct Ink Writing (DIW), Liquid De-

position Modelling (LDM), Fused Deposition Modeling (FDM), Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS), il Digital Light Processing (DLP), ecc. sono applicati a diversi tipi di materiali (Gobbin et alii, 2021). L'introduzione di alcuni di questi processi anche nel settore lapideo, consentirebbe un totale recupero degli scarti di cava tramite un processo di stampa flessibile e adattivo.

La stampa 3D in Architettura | Le più recenti sperimentazioni nel settore delle costruzioni spaziano dalla stampa sul sito dell'intero modulo (Russo and Moretti, 2020) all'assemblaggio di componenti prodotti in stabilimento, con deposizione di strati di miscele cementizie, calcestruzzo, terra cruda, materiali di sintesi, ecc. (Tab. 2). Fra le realizzazioni più note il modulo abitativo TECLA⁴, progettato da Mario Cucinella (Figg. 1, 2): è stato realizzato nel 2019 con un impasto a base di terra cruda e prodotto con tecnologia digitale (Crane di Wasp) tramite una stampante assemblabile in diverse configurazioni. Un singolo modulo, dal diametro di 6,60 metri e altezza di 3 metri, può essere realizzato con impasti di cemento, biocemento e terra / argilla. La realizzazione di un modulo TECLA ha impiegato 200 ore di stampa, 7.000 codici macchina (G-code), 350 strati di 12 mm di materiale, 150 km di estrusione, 60 mc di materiali naturali per un consumo medio inferiore di 6 kW, altamente innovativo non solo nel processo produttivo, ma anche nella concezione strutturale.

Altre sperimentazioni recenti con la medesima tecnologia hanno prodotto moduli in calcestruzzo che possono essere assemblati in cantiere. Tra queste il prototipo che è stato costruito nel 2021 da una collaborazione fra la Eindhoven University, la Municipalità e imprese di costruzioni (Jongsma, 2021). Nel 2016 invece Killa Design ha progettato a Dubai un edificio stampato in 3D⁵ alto 6 metri e lungo 36 producendolo in 17 giorni, attraverso un braccio robotico automatizzato e installandolo in 2 giorni. La miscela di materiale utilizzato è composta di cemento, fibra di vetro e polimeri fibrorinforzati⁶, il costo della manodopera è stato ridotto del 50% rispetto agli edifici costruiti con tecnologie convenzionali e di dimensioni simili e gli sprechi in loco sono stati minimi, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale complessivo del progetto.

Le criticità che emergono in questi moduli, indipendentemente dal materiale, sono legate alle prestazioni energetiche e all'aspetto. Sono da indagare quindi i requisiti legati al contenimento dei consumi energetici in termini di involucro e la texture superficiale che, per caratteristiche intrinseche della stampa 3D, mantiene visibile la lettura degli strati di deposizione delle miscele e una finitura apparentemente grezza.

Esistono poi altre sperimentazioni di moduli stampati per FDM con materiale polimerico, di riciclo e bio-polimeri, come i moduli del Padiglione Europe Building⁷ di DUS Architects ad Amsterdam, realizzati nel 2015 (Fig. 3) i cui elementi modulari (della dimensione fino a 2 x 2 x 3,5 metri) in bio-polimero sono stati completamente riciclati dopo la dismissione (Gasparini, 2017). Non meno interessante è l'esperimento chiamato Saltygloo (2013; Figg. 4, 5), che utilizza sale raccolto localmente dalla Baia di San Francisco miscelato con un legante di sintesi (colla) per dare vita a un materiale resistente, impermeabile, leggero, traslucido ed economico. Il modulo abitativo è composto da 336

pannelli traslucidi, ognuno dei quali ricorda la forma cristallina del sale, assemblati con rotazioni e aggregazioni apparentemente casuali e collegati tra loro da aste di alluminio tensoflesse, che rendono la struttura estremamente leggera, trasportabile e assemblabile; la traslucenza del materiale consente alla luce naturale di permeare lo spazio e mettere in evidenza la struttura (Mattioli, 2014).

È da rilevare tuttavia che se le potenzialità di queste sperimentazioni risiedono nell'impiego di materiale da riciclo, la composizione multimaterica delle miscele (a base di bioplastiche o argilla o sale) solleva qualche dubbio sulla separabilità delle materie prime e sul loro riciclo, soprattutto per il modulo Saltygloo che utilizza la colla come matrice.

Infine risale al 2009 il primo esperimento di stampa di miscele di polveri tramite tecnologia BJ. Radiolaria Pavilion sviluppato da Shiro Studio con D-Shape è una microarchitettura che impiega una miscela di stampa composta da un materiale inorganico, sabbia o polvere minerale e un legante in forma liquida, conferendo al prodotto finale compattezza e un effetto simil lapideo (Turner, 2009): nonostante la sperimentazione non abbia avuto sviluppi ulteriori, di recente è stata ripresa da gruppi di ricerca e produttori di stampanti 3D di grandi dimensioni. Questi sistemi di stampa e miscele in via di sperimentazione riescono a esprimere al meglio le loro potenzialità nella produzione di elementi scultorei e di arredo anche di notevoli dimensioni, oppure in moduli replicabili a scale e quantità diverse, senza necessariamente svilupparsi lungo una filiera industrializzata.

La stampa multimateriale con gli scarti di cava | La stampa multimateriale (Multi Material Additive Manufacturing – MMAM) è un processo produttivo emergente legato alla tecnica della MA che consiste nella formulazione di miscele di polveri di due o più materiali, aventi proprietà diverse, da utilizzare in un processo additivo (stampa su 'letto di polvere') per realizzare oggetti e componenti in materiale composito (Pajonk et alii, 2022; Lowke et alii, 2018). Durante il processo di stampa un fluido (attivatore) è depositato selettivamente sulla miscela composta da aggregati e legante (sabbia o polvere lapidea e cemento); a reazione avvenuta, le 'polveri' solidificheranno dando luogo alla forma prestabilita del componente (Paolini, Kollmannsberger and Rank, 2019).

La MA che utilizza le miscele di polveri potrebbe fornire un interessante apporto al settore lapideo, se utilizzata in affiancamento alla manifattura sottrattiva, per il recupero sia degli scarti di cava che di lavorazione. I vantaggi maggiori della MA risiedono nella possibilità di creare geometrie complesse, nel risparmio di tempo attraverso iterazioni rapide e la riduzione dei tempi di consegna, nella capacità di produrre oggetti personalizzati di massa (Pajonk et alii, 2022), nonché nel risparmio sui costi e sui consumi energetici (Horvath, Trachte and Pardo, 2021). I principi della produzione di componenti in pietra artificiale tramite MA si basano sulla costruzione della geometria strato per strato in un processo di produzione sequenziale reso possibile dalla generazione di un modello con un software parametrico (Turunen, 2016).

A tal proposito Lowke et alii (2018) individuano tre tipi di processi a letto di polvere (particle-bed): Selective Binder Activation, in cui la miscela di polveri è costituita da un aggregato fine e da

un legante, ad esempio sabbia e cemento, a cui viene aggiunto selettivamente un attivatore liquido, come acqua con additivi; Selective Paste Intrusion, in cui il letto di particelle contiene solo l'aggregato e il fluido depositato selettivamente è una pasta legante costituita da cemento, acqua e additivi; Binder Jetting, in cui il letto di particelle è una miscela di aggregato e attivatore su cui viene applicato selettivamente un legante liquido.

In particolare la tecnologia BJ consente la produzione di componenti non strutturali in pietra artificiale anche per bassi volumi di produzione e con complessità geometrica elevata, possibilità non sempre attuabile con la MS. La scelta della tecnologia MA più idonea dipende da molti fattori: il tipo di materiale, le sue proprietà, i vincoli di progettazione e la complessità della forma, tutte funzioni di un approccio, quello del Design for Additive Manufacturing, che mira a progettare specificatamente una parte o un prodotto per una facile fabbricazione (Wiberg, Persson and Ölvander, 2019).

Negli ultimi anni le miscele di polveri di derivazione lapidea utilizzate con la tecnologia BJ sono state sempre più perfezionate, raggiungendo prestazioni meccaniche interessanti, in termini di resistenza a compressione, porosità e lavorazioni post-produzione. Durante il processo la stampante deposita a strati alterni le polveri della miscela lapidea e il fluido attivatore su aree definite dal modello digitale 3D dell'oggetto; alla fine del processo la polvere di risulta viene rimossa e conservata per il riutilizzo; l'aggregato non reattivo utilizzato è composto da sabbia di fiume e una formulazione di particelle di vetro poroso (Gobbin et alii, 2021). Recenti formulazioni della miscela hanno prodotto un netto miglioramento delle prestazioni meccaniche rispetto i primi esperimenti, ottenendo una resistenza a compressione di 20 Mpa, con una porosità media del 30% (Elsayed et alii, 2022).

Il progetto della seduta Arcadia con manifattura additiva e sottrattiva | La seduta da esterni Arcadia (Fig. 6), presentata all'evento Marmomac Verona 2021, è composta da due elementi il cui progetto è stato sviluppato con il software Rhino+Lumion, modellatore parametrico utile per la fabbricazione digitale di due prototipi con tecnologia MA e MS. La prima versione del prototipo, realizzata con tecnologia BJ⁹, è stata prodotta con la Desa1 150.150 della Desamanager Srl il cui volume di stampa è pari a 1,5 x 1,4 x 1,4 mc e la 'cubic voxel resolution' è pari 5,7 x 5,7 x 5,7 mmc (Fig. 7). Il file '.stl' generato dal modellatore è stato elaborato tramite un software di slicing proprietario di Desamanager⁹ utilizzando un voxel isotropico di 5,7 x 5,7 x 5,7 mmc. Il processo di produzione complessivo è simile a quelli descritti in Gobbin et alii (2021) e in Elsayed et alii (2022). La miscela di polveri utilizzata, che può essere composta da diversi aggregati e leganti, nel progetto in esame (Tab. 3) era composta per il 67% da un aggregato lapideo ricavato da scarti di cava polverizzati (Bianco di Zandobbio – Dolomite) e per il 33% da polveri leganti (in totale circa 2.300 kg di mix di stampa, pari a 1,4 mc; Fig. 8).

La polvere legante impiegata è un mix di cemento fosfato-magnesiano con granulometria sotto i 200 micron mentre l'aggregato non reattivo, il Bianco di Zandobbio, presenta una granulometria compresa tra 0 e 2 mm. La miscela per il letto di polvere è stata preparata mescolando tutte le



Fig. 1 | TECLA, an eco-sustainable module printed with LDM technology, designed by WASP and Mario Cucinella Architects (credit: WASP; I. Corazza).

Fig. 2 | Construction of the TECLA module (credit: WASP).

Fig. 3 | The Europe Building Pavilion, designed by DUS-Architects (credits: Aectual and DUS Architects; O. van Duivenbode).

materie prime in una betoniera per circa 20 minuti, invertendo l'inclinazione del tamburo a metà tempo (Fig. 9). Dopo lo scarico delle polveri è stata verificata la buona omogeneizzazione e stabilità della miscela. Il liquido attivante, depositato selettivamente dalla testa di stampa sul letto di polvere, è semplice acqua; per completare l'opera ne sono stati spruzzati, strato dopo strato, circa 50 litri (Fig. 10).

I tempi di lavorazione totale sono stati di 58,5 ore. Le operazioni di pre-produzione (la preparazione del materiale, la scelta della distribuzione granulometrica e la miscelazione delle polveri) hanno visto impegnate tre persone per una giornata lavorativa, mentre la fase di stampa è durata circa 2,5 ore; infine la post-produzione (relativa all'estrazione e recupero del materiale, alla pulizia e alla lucidatura dell'oggetto) ha necessitato di due giornate di lavoro e due persone (Fig. 11).

Il materiale di risulta (non attivato dal liquido e che ha svolto funzione di sostegno durante la produzione) è stato quantificato nel 72% della miscela totale ed è stato possibile reimpiegarlo in diverse stampe successive. È stata quantificata una



Figg. 4, 5 | Saltygloo, housing module: Prototype; individual printed modules to be assembled (credits: Emerging Objects / Ronald Rael + Virginia San Fratello).

Figg. 6, 7 | Arcadia: Seat made with additive manufacturing; The printer (credits: F. Lasala and L. Favaron).

bassa percentuale di scarto di materiale (5-7%) derivata dalle lavorazioni di preparazione e stampa, estrazione e recupero della polvere dal piano, pulizia superficiale del campione e post produzione¹⁰. Le potenzialità di questo processo risiedono nella replicabilità e nella possibilità di produzione contemporanea di moduli formalmente diversi, senza necessità di produrre stampi o altri supporti economicamente impattanti.

La seconda versione del prototipo è stata realizzata con tecnologia MS a partire da un blocco di Pietra di Vicenza (Fig. 12); tramite un centro di lavoro a 5 assi interpolati con annesso tornio controllato dinamico (CNC Osai, modalità Open, con interprete del codice ISO di alto livello) sono state necessarie 50 ore di lavorazione (Tab. 3). Mentre il volume del blocco lapideo era pari a circa 1,14 mc quello finale (netto) della seduta è pari a 0,232 mc, con una produzione di sfrido dell'80% circa (in linea con i dati internazionali mostrati in Tabella 1). Lo sfrido non è stato riciclato ed è stato conferito differenzialmente: l'inerte pulito è stato utilizzato per ripristini ambientali, sottofondi stradali, ecc., mentre quello con residui di sostanze inquinanti (quali resine) è stato smaltito in discariche autorizzate.¹¹

Risultati e discussione | Confrontando i dati forniti dalle aziende che hanno realizzato le due sedute emerge che i due prodotti hanno richiesto un impegno sostanzialmente diverso per le fasi produzione / formatura e post-produzione / lucidatura, con una inversione dei costi: la produzione con MS ha richiesto un elevato numero di ore di produzione, mentre quella con MA ha impegnato molte ore di post-produzione. Alcune fasi di pre e post produzione della sperimentazione sono state eseguite da personale non specializzato, pertanto è ipotizzabile un contenimento delle ore lavorative con l'impiego di personale qualificato o tramite l'ausilio del CNC. Una differenza importante nei due processi è relativa al volume di materiale impiegato: per produrre una seduta di volume pari a 232,5 dmc con la tecnologia MS è richiesto un volume di materiale di scavo pari a 5 volte il volume finale del prodotto, mentre con la MA il volume prodotto è quasi uguale al volume di materiale impiegato e l'esigua quantità di scarto può essere reimpiiegata nel processo successivo; di fatto, in entrambi i processi lo scarto in prima fase è stato quantificato in circa 80% del materiale impiegato, ma nella MA il 72% di questo 80% è stato reintrodotta in produzione.

Anche il peso specifico dei materiali è diverso: la miscela utilizzata per la stampa multimateriale ha un peso specifico inferiore del 20% circa rispetto quella prodotta in marmo, perché la composizione della miscela di stampa contiene una percentuale variabile (20-40%) di altri materiali (leganti e aggregati leggeri); tuttavia è da rilevare che tali percentuali costituiscono delle variabili in funzione del materiale lapideo utilizzato sia per la miscela che per il prodotto in MS. Anche i costi del materiale e dell'oggetto prodotto sono nettamente diversi: la polvere lapidea, che è ricavata da scarto di estrazione e produzione, ha un valore di mercato inferiore rispetto al blocco intero, mentre, dal punto di vista commerciale, nella seduta di marmo realizzata con MS al prezzo di vendita viene imputato il costo dell'intero blocco estratto (quindi un volume 5 volte maggiore). In termini economici appare quindi più vantaggiosa la produzione con tecnologia MA di elementi in materiale composito lapideo, sia per i tempi di produzione che per i costi del materiale (in gran parte scarto di cava). Tuttavia gli elementi realizzati con questa tecnologia presentano due aspetti critici: il primo sulla tessitura di superficie (Fig. 13), il secondo sulla resistenza a compressione. Allo stato attuale i moduli realizzati con queste miscele sembrano idonei alla produzione di elementi di tipo non-strutturale; infatti mentre la Pietra di Vicenza ha una resistenza compressione media compresa fra 19,8 a 26,6 MPa (Uni 9724/3), la pietra artificiale resiste a compressioni fino a 20 MPa (Elsayed et alii, 2022).

La seconda criticità 'evidente' è relativa alla rugosità superficiale della seduta prodotta con MA: trattandosi di una miscela di polveri, depositata strato per strato, il risultato finale presenta una superficie molto ruvida, non lucida e compatta come la pietra, e di colore uniforme (secondo la polvere di marmo impiegata), senza le venature e le cromie tipiche dei lapidei. Per tale ragione, se la miscela è intesa come sostituzione della pietra sui prodotti realizzati con MA devono essere fatti trattamenti superficiali – che incidono ovviamente sul costo finale del prodotto – per renderli quanto più possibile lisci e uniformi come un lapideo.

Conclusioni | L'analisi fin qui condotta, seppure in modo empirico, restituisce le potenzialità applicative della Manifattura Additiva nel settore dell'Architettura e del Design, sia in termini di complessità delle forme realizzabili che di benefici economici e ambientali. La possibilità di riutilizzare gli scarti di cava e re-immeterli in un ciclo produttivo altamente tecnologico, con un basso impatto ambientale e costi ridotti, risponde alle richieste di un mercato sulla personalizzazione del prodotto, superando le logiche e i costi di una produzione industrializzata su larga scala.

I risultati conseguiti dalle ricerche recenti incoraggiano al trasferimento della sperimentazione per la produzione di elementi modulari non-strutturali, di rivestimento parietale (anche decorativo) o per l'arredo urbano, seppur con i punti di debolezza rispetto a finitura superficiale e prestazioni meccaniche della materia stampata. Un'altra criticità si potrebbe ravvisare nella riciclabilità del prodotto finale: trattandosi di un materiale composito dovranno essere valutate anche le prospettive di dismissione e trasformazione dei componenti.

Allo stato attuale le sperimentazioni per il recupero della polvere da sfridi lapidei si stanno moltiplicando, utilizzando anche altre tecnologie di stampa 3D e testando miscele diverse di materiali, anche sotto forma di impasti. Appaiono degni di nota, per esempio, il modulo in pietra artificiale prodotto da Wasp in collaborazione con il Politecnico di Bari (Fig. 14), realizzato con una miscela di calce e polvere di marmo¹² e impiegato in via sperimentale nel Da Vinci Bridge, progettato dal team del Prof. Giuseppe Fallacara¹³, così come altre sperimentazioni esposte all'interno del Marmomac Meets Academies 2023 di Verona e realizzate con formulazioni e tecnologie digitali diverse, come i prototipi Technovauld di Dustin White (Fig. 15) e Butterfly Wing di Nicola Parisi e Francesco Fieni (Fig. 16).

La ricerca si sta quindi sviluppando su diversi livelli, in termini di tecnologie e materiali, con aspettative di applicazioni e replicabilità a scale diverse: dai piccoli moduli replicabili agli elementi unici e fino ai componenti strutturali, utilizzando miscele con polvere di lavorazione o fanghi dalle migliorate prestazioni meccaniche. Tuttavia si rende necessario approfondire ulteriori questioni che potrebbero riguardare, da un lato, la LCA di prodotti e componenti (di diversa foggia e utilizzo) realizzati con MA e riciclo degli scarti di cava, dall'altro, in assenza di norme di riferimento, lo studio di norme specifiche su formulazioni e prestazioni.

In conclusione si può ipotizzare che in un futuro prossimo il riciclo degli scarti lapidei possa svilupparsi lungo tutta la filiera, con impasti e miscele che consentono di utilizzare sfridi, polveri e fanghi reimpiiegando il materiale di scarto in diversi settori produttivi e per diverse applicazioni, partendo dal presupposto che questi prodotti non devono essere considerati sostituti degli elementi lapidei, ma complementari e finalizzati al recupero dei quell'80% di materiale di scarto in un'ottica di innovazione e circolarità.

Climate change and certain catastrophic natural events in the last two decades have contributed to the spread of greater environmental awareness, especially with respect to the exploitation of nat-

ural resources that, since the first Industrial Revolution, were considered almost unlimited. The most critical economic sectors in this regard are construction and mining, which together produce 65% of waste on a European scale (EEA, 2023). However, after the years of the economic boom and the first energy crises, a greater awareness developed with respect to the limited availability of natural resources, on the one hand thus finding the incompatibility between extractive activities and environmental quality (Monsù Scolaro, 2017), and on the other hand with the production of manufactured goods using waste material (Baratta et alii, 2023) or bio-based (Violano, Cannaviello and Del Prete, 2021).

In this scenario, the need for a design and production renewal to reintegrate scrap material into the production cycle (Baratta, 2021) in a product flexibility and customisation perspective becomes concrete. To achieve the goal even in the stone sector, the development of the production of building components from scrap in a circularity perspective is desirable (Di Roma, Scarcelli and Minenna, 2019). This approach would first lead to a drastic reduction of waste and shapelessness in quarries and landfills and, with a design paradigm shift, to the reduction and control of mining. The digitisation of design and manufacturing today can also increase the design of fast and cost-effective systems and processes for producing building components, building systems and architectures with low environmental impact, focused on the specific needs of individual users (Weinstein, 2020). The objective of the research presented in the article is to explore new industrial symbiosis production strategies for the reuse of quarry waste, aimed at the production of building components by the principles of sustainability, resilience, and human-centric-design sanctioned by the European Union (European Commission et alii, 2021). The paper investigates the potential of an alternative and complementary production process to subtractive manufacturing for stone materials in order to reduce the environmental impact from quarry exploitation and fully reuse waste in both extraction and processing.

For objective evaluation, a project made with both Subtractive Manufacturing (SM) and Additive Manufacturing (AM) will be analysed to compare production data in terms of time, environment, and form. The potential of AM for making customised components and products could meet contemporary environmental and production needs economically and without waste; in particular, the production of components from stone powder using the 3D printing method can allow 100% reuse of waste, with significant flexibility in terms of form, function, and circularity.

The article is structured into three parts: the first connects the cultural and production context within which the research is situated; the second analyses the state of the art regarding the use of AM in the construction industry; and the third describes the outcomes of a research and development work on the fabrication of some components from excavated and recycled stone materials using SM and AM. In particular, ongoing and published research on using AM in architecture to fabricate housing modules using 3D printing materials and technologies was reviewed for state-of-the-art analysis.

Process	Production Step machine/hours	Processing Step men/hours	Material Waste and Volume	Weight of Waste	Weight of Arcadia
Additive Manufacturing	2.5	56.0 (30.0)* *skilled labour	2,300 kg 1.4 mc (+ 50 lt H ₂ O)	1,650 kg (reused) + 150 kg (waste)	450 kg
Subtractive Manufacturing	40.0	10.0	2,520 kg 1.14 mc	2,005 kg	520 kg

Tab. 3 | Comparison of Arcadia production with AM and SM process.

Binder Jetting (BJ) technology with recycled stone powder was explored in depth. The case study was carried out within a research and development collaboration between three different realities: the company Desamanera srl, a manufacturer of large-scale 3D printers (in collaboration with the University of Padua) for the model made with BJ technology; the Academy of Fine Arts of Verona¹ for the design part; and the Marble School of Verona for the production of the same element with SM. The method of work and analysis was based on empirical observation of data and results that provide an indicator with respect to the potential of BJ technology in architecture and design, but the tests will need to be deepened and refined on case studies of different sizes.

The cultural and manufacturing context | Since parametric design and large-format 3D printing have entered powerfully into all sectors, including the construction industry, the formal variables and scope of what can be built have expanded dramatically, reducing the time and errors due to the passage of information (Sposito and Scalisi, 2017). For several years, we have been witnessing the creation of housing modules produced using additive manufacturing techniques while initially producing small modular components that could be reproduced in a short time and with synthetic materials. As the technology has improved, the size of the machines has increased, and the materials that can be used have multiplied, moving from synthetic materials to mixtures of natural materials such as earth, marble powders, and salt mixtures; at the same time, the size of the modules has also increased, and they have become true housing cells.

Today, AM can be applied to the construction sector in two ways: to produce modular components assembled into larger structures or to print entire housing modules (Sposito and Scalisi, 2017). In this context, in the binomial parametric design / 3D printing of components, the concept of 'module' takes on a double meaning: it is not only a reproducible component, but it is also a code of human-machine communication, where repeated algorithms (e.g., fractals) allow the realisation, layer by layer, of three-dimensional objects with the most disparate shapes and textures.

In the digital shift, design has entered a dimension in which the geometry of forms is generated by a mathematical model based on 'parameters': a simple repetition using historically known rules such as Fibonacci and the like (Jabi, 2013). The concept of parametric design originated in the last century and can be traced back to the studies of Luigi Moretti (1974a, 1974b) and Bruno De Finetti,

Frei Otto and more recently in Zaha Hadid, Gregg Lynn, ONL and others (Premier, 2017).

With a pioneering approach nearly 60 years ahead of contemporary design trends, Moretti addressed issues related to form and its generative processes, introducing the concept of 'mathematical modelling', a precursor to parametric design. In 1957, Moretti, alongside Bruno De Finetti, founded the Institute for Mathematical and Operational Research Applied to Urban Planning (IR-MoU), aiming to advance studies in the so-called 'parametric architecture' (Esposito De Vita, 2009). The project, understood as the result of generative processes that Moretti has digitally perfected, is thus conceived as the result of systemic balances open to the future (Ciribini, 1984).

The work of Frei Otto, considered the father of tensile structures, was also influenced by the observation and imitation of natural structures; he designed organic structures as a result of observing the evolutionary processes occurring in nature and reflected them in parameter-based mathematical models. In more recent times, Zaha Hadid has been recognised as an interpreter of parametric architecture, which she has been able to concretise in architectures with both fluid and deconstructed forms, bringing together academic training in mathematics and that in architecture. In the 21st century, the development of computer tools has thus transformed design into a complex system of interactions and successive aggregations of three-dimensional geometric modules that come together to form spatial structures (Marcolli, 1978), providing designers with the tools to simulate the complexity observed in nature and apply it to different scales, contributing 'from the spoon to the city, to the building of a new culture'² (Lidinger, 1986; Erlhoff, 1986).

The parallel development of three-dimensional printing technologies in the last two decades has given further impetus to the application of parametric design, enabling the creation of modules with fluid and complex shapes that would require considerable time and cost to produce with traditional building systems; this has encouraged experimentation with new man-made and naturally derived materials, e.g., biomaterials and recycled materials such as quarry waste.

The search for and introduction of alternative and highly innovative materials even in the stone industry has been driven in recent years by a number of determining factors: from the reduction of natural resources to the increased environmental sensitivity with respect to the exploitation of stone quarries, to the rising cost of raw materials. The mining and production processes that have char-

acterised stone products to date still have a high percentage of waste and shapelessness, which for some stones is considerable and has major environmental repercussions, both on the exploitation of natural sites and their disposal.

Reports on the global stone industry (Tab. 1) show that gross quarry production more than doubled in 15 years (2003-2018) reaching 313,000



Fig. 8 | Arcadia: selection and dosing of printing powders (credit: F. Lasala and L. Favaron).

Fig. 9 | Arcadia: powder mixing stage (credit: F. Lasala and L. Favaron).

tons in 2018; likewise, net of mining and processing waste, the net total processed and finished stone products stood at about 90,000 tons in 2018. To be precise, as much as 71% of the material is transformed into waste, in two distinct stages: mining waste constitutes 51%, while processing waste constitutes 41% on the raw production quantity (Italian Trade Agency, 2020, 2021; Montani, 2017). Table 1 shows that over 15 years the proportion of excavation to waste has remained constant, so it is presumable that environmental and production policies still need to be implemented, including introducing new extraction and processing technologies, in synergy with design strategies aimed at minimising waste.

To date, the prevailing production process in the stone industry is related to CNC subtractive manufacturing; this 'sculptural' technique removes material from a stone block and has contributed to many complex designs (Turunen, 2016). However, this technique has limitations related to the formal aspect of the products (difficulty in producing hollow and complex shapes) and the production of a high percentage of scrap. Research and development activities over the past 15 years in the areas of digital and materials engineering have contributed to the gradual integration of some AM processes in architecture and design as well.

Unlike SM, AM does not waste material and has already been used in mechanical and product design for many years with different techniques: If Fused Filament Fabrication (FFF), stereolithography, and robotic arms are the most common additive manufacturing techniques when large-scale architecture-related objects are printed³, Binder Jetting (BJ) prevails in the ceramics sector, while Direct Ink Writing (DIW), Liquid Deposition Modelling (LDM), Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), Digital Light Processing (DLP), etc. are applied to different types of materials (Gobbin et alii, 2021). Introducing some of these processes to the stone industry would also allow total recovery of quarry waste through a flexible and adaptive printing process.

3D printing in Architecture | The most recent experiments in the construction sector range from on-site printing of the entire module (Russo and Moretti, 2020) to the assembly of factory-produced components, with deposition of layers of cement mixtures, concrete, unfired earth, synthetic materials, etc. (Tab. 2). Among the best-known realisations, the housing module TECLA⁴, designed by Mario Cucinella (Figg. 1, 2), was made in 2019 with a raw earth-based mixture and produced with digital technology (Crane by Wasp) through a printer that can be assembled in different configurations. A single module with a diameter of 6.60 meters and a height of 3 meters can be made with cement, biocement, and earth/clay mixtures. The fabrication of a TECLA module took 200 hours of printing, 7,000 machine codes (G-codes), 350 layers of 12 mm material, 150 km of extrusion, and 60 cubic metres of natural materials for an average consumption of less than 6 kW. The module was highly innovative not only in the production process but also in structural design.

Other recent experiments with the same technology have produced concrete modules that can be assembled on-site. These include the prototype that was built in 2021 by a collaboration be-

tween Eindhoven University, the Municipality and construction companies (Jongsma, 2021). In 2016, on the other hand, Killa Design designed a 3D-printed building in Dubai⁵, 6 meters high and 36 meters long, producing it in 17 days through an automated robotic arm, and installing it in 2 days. The material mixture used is composed of cement, fibreglass, and fibre-reinforced polymers⁶, and labour costs were reduced by 50% compared to buildings constructed with conventional technologies of similar size, and on-site waste was minimal, helping to reduce the project's overall environmental impact.

The critical issues that arise in these modules, regardless of the material, are related to energy performance and appearance. Thus, the requirements associated with the containment of energy consumption in terms of the envelope and the surface texture are to be investigated, which, due to inherent characteristics of 3D printing, the reading of the layers of mixture deposition and a seemingly rough texture is kept visible. Then there are other experiments of FDM-printed modules with polymeric, recycled and bio-polymer materials, such as the modules of the Europe Building Pavilion⁷ by DUS Architects in Amsterdam, made in 2015 (Fig. 3), whose modular elements (sized up to 2 x 2 x 3.5 meters) made of bio-polymer were completely recycled after decommissioning (Gasparini, 2017). No less interesting is the experiment called Saltygloo (2013; Figg. 4, 5), which uses locally harvested salt from the San Francisco Bay mixed with a synthetic binder (glue) to create a lightweight, durable, waterproof, translucent, and inexpensive material. The housing module is composed of 336 translucent panels, each reminiscent of the crystalline shape of salt, assembled with seemingly random rotations and aggregations and connected by tensoflexed aluminium rods, which make the structure extremely lightweight, transportable, and assemblable; the translucency of the material allows natural light to permeate the space and highlight the structure (Mattioli, 2014).

It should be noted, however, that while the potential of these experiments lies in the use of recycled material, the multi-material composition of the mixtures (based on bioplastics or clay or salt) raises some doubts about the separability of raw materials and their recycling, especially for the Saltygloo module that uses glue as a matrix.

Finally, the first experiment in powder mixture printing using BJ technology dates back to 2009. Radiolaria Pavillion, developed by Shiro Studio with D-Shape, is a microarchitecture that employs a printing mixture composed of an inorganic material, sand or mineral powder, and a binder in liquid form, giving the final product compactness and a stone-like effect (Turner, 2009); however, the experiment has not been further developed, it has recently been taken up by research groups and manufacturers of large-scale 3D printers. These experimental printing systems and blends manage to express their potential best in the production of sculptural and furniture elements, even of considerable size or in modules that can be replicated at different scales and quantities, without necessarily developing along an industrialised supply chain.

Multimaterial printing with quarry waste | Multi-Material Additive Manufacturing (MMAM) is

an emerging manufacturing process related to the AM technique that involves the formulation of powder mixtures of two or more materials, having different properties, to be used in an additive process (printing on a 'bed of powder') to make composite objects and components (Pajonk et alii, 2022; Lowke et alii, 2018). During the printing process, a fluid (activator) is selectively deposited on the mixture consisting of aggregates and binder (sand or stone powder and cement); upon reaction, the 'powders' will solidify, resulting in the pre-determined shape of the component (Paolini, Kollmannsberger and Rank, 2019).

The use of AM with powder mixtures could significantly contribute to the stone industry when used alongside subtractive manufacturing, enabling the recovery of quarry and processing waste. The primary advantages of AM lie in its ability to create complex geometries, save time through rapid iterations and reduced delivery times, produce mass-customized objects (Pajonk et alii, 2022), and cost and energy savings (Horvath, Trachte and Pardo, 2021). The principles of manufacturing artificial stone components using AM are based on building the geometry layer by layer in a sequential manufacturing process made possible by generating a model with parametric software (Turunen, 2016).

In this regard, Lowke et alii (2018) identify three types of particle-bed processes: Selective Binder Activation, in which the particle-bed mixture consists of a fine aggregate and a binder, such as sand and cement, to which a liquid activator, such as water with additives, is selectively added; Selective Paste Intrusion, in which the particle-bed contains only the aggregate and the fluid selectively deposited is a binder paste consisting of cement, water and additives; and Binder Jetting, in which the particle-bed is a mixture of aggregate and activator. A liquid binder is selectively applied to it. In particular, BJ technology enables the production of non-structural components from artificial stone even for low production volumes and with high geometric complexity, a possibility only sometimes feasible with MS. The choice of the most suitable AM technology depends on many factors, including the type of material, its properties, design constraints, and shape complexity, all functions of an approach, that of Design for Additive Manufacturing, which aims to specifically design a part or product for easy fabrication (Wiberg, Persson and Ölvander, 2019).

In recent years, the stone-derived powder mixtures used with BJ technology have been increasingly refined, achieving attractive mechanical performance in terms of compressive strength, porosity and post-production processing. During the process, the printer deposits the stone mixture powders and activator fluid in alternating layers over areas defined by the 3D digital model of the object; at the end of the process, the resulting powder is removed and stored for reuse. The nonreactive aggregate used consists of river sand and a formulation of porous glass particles (Gobbin et alii, 2021). Recent formulations of the mixture have produced a marked improvement in mechanical performance over early experiments, achieving a compressive strength of 20 Mpa, with an average porosity of 30% (Elsayed et alii, 2022).

The design of the Arcadia seat with additive and subtractive manufacturing | The Arcadia

outdoor seat (Fig. 6), presented at the Marmomac Verona 2021 event, consists of two elements whose design was developed with Rhino+Lumion software, a parametric modeller useful for digital fabrication of two prototypes, with AM and SM technology.

The first version of the prototype, made with BJ technology⁸, was produced with Desa1 150,150 from Desamanageria Srl, whose print volume is 1.5 x 1.4 x 1.4 cubic metres and the 'cubic voxel resolution' is 5.7 x 5.7 x 5.7 cubic millimetres (Fig. 7). The '.stl' file generated by the modeller was processed through Desamanageria's proprietary slicing software⁹ using an isotropic voxel of 5.7 x 5.7 x 5.7 cubic millimetres. The overall manufacturing process is similar to those described in Gobbin et alii (2021) and Elsayed et alii (2022). The powder mix used, which can be composed of different aggregates and binders, in the project under review (Tab. 3) was composed of 67% stone aggregate from pulverised quarry waste (Bianco di Zandobbio – Dolomite) and 33% binder powders (in total about 2,300 kg of press mix, equal to 1.4 cubic metres; Fig. 8).

The binding powder used is a phosphate-magnesium cement mix with a particle size below 200 microns while the nonreactive aggregate, Zandobbio White, has a particle size between 0 and 2 mm. The mixture for the powder bed was prepared by mixing all the raw materials in a concrete mixer for about 20 minutes, reversing the drum inclination halfway through (Fig. 9). After the powders were discharged, the mixture was checked for good homogenisation and stability. The activating liquid, selectively deposited by the printing head on the powder bed, is simple water; about 50 litres were sprayed layer by layer to complete the work (Fig. 10).

The total processing time was 58.5 hours. Pre-production operations (the preparation of the material, the choice of particle size distribution and the mixing of powders) took three people one working day, while the printing phase took about 2.5 hours; finally, post-production (related to the extraction and recovery of the material, cleaning and polishing of the object) required two working days and two people (Fig. 11).

The waste material (which was not activated by the liquid and served as a support function during production) was quantified as 72% of the total mixture and could be reused in several subsequent prints. A low percentage of material waste was quantified (5-7%) from the preparation and printing processes, extraction and recovery of the powder from the plane, surface cleaning of the sample and post-production¹⁰. The potential of this process lies in replicability and the possibility of simultaneous production of formally different forms without the need to produce moulds or other economically impactful media.

The second version of the prototype was made with SM technology from a block of Vicenza Stone (Fig. 12); using a 5-axis interpolated machining center with an attached dynamic controlled lathe (Osai CNC, Open mode, with high-level ISO code

Fig. 10-13 | Arcadia: Printing stage; Post-production polishing stage; Seat made with subtractive manufacture; Detail of the surface texture (credits: F. Lasala and L. Favaron).

Fig. 14 | An ashlar of the Da Vinci Bridge (credit: WASP).





Fig. 15 | TechnoVault, designed by Dustin White, prototype displayed at the Marmomac Meets Academies 2023 event (credit: K. Gasparini).

Fig. 16 | Butterfly Wing, designed by Nicola Parisi and Francesco Fieni, prototype exhibited at the Marmomac Meets Academies 2023 event (credit: K. Gasparini).

interpreter), 50 hours of machining were required (Tab. 3). While the volume of the stone block was about 1.14 cubic meters the final (net) volume of the session was 0.232 cubic meters, producing about 80% scrap (in line with international data shown in Table 1). The scrap was not recycled and was conferred differentially: clean aggregate was used for environmental restoration, road subgrade, etc., while that with pollutant residues (such as resins) was disposed of in licensed landfills.¹¹

Results and discussion | Comparing the data provided by the companies that produced the two seats, it is evident that the two products required substantially different efforts for the production / forming and post-production/polishing phases, with a cost reversal: production with SM required a high number of production hours, while production with AM involved many hours of post-production. Some pre- and post-production phases of the experimentation were carried out by non-specialized personnel; therefore, working hours could be reduced with qualified personnel or through CNC technology. An important difference between the two processes is related to the volume of material used: to produce a seat with a volume of 232.5 cubic decimeters using SM technology, a volume of excavation material five times the final product's volume is required, whereas with AM, the produced volume is nearly equal to the volume of material used, and the minimal waste can be reintroduced into the subsequent process. In fact, in both processes, the initial waste was quantified at approximately 80% of the material used, but in AM, 72% of this 80% was reintroduced into production.

Furthermore, the specific weight of the materials is also different: the mixture used for multi-material printing has a specific weight approximately 20% lower than that produced in marble. This is because the composition of the printing mixture contains a variable percentage (20-40%) of other materials (binders and lightweight aggregates). However, it is worth noting that these percentages are variables depending on the type of stone material used, both for the mixture and the product in SM.

Material and product costs are also significantly different: the stone powder, which is derived from extraction and production waste, has a lower market value compared to the entire block. From a commercial standpoint, the cost of the entire extracted block is included in the selling price of the marble seat produced with SM (which is five times the volume). In economic terms, the production of composite stone elements using AM technology appears more advantageous, both in terms of production times and material costs (which are largely quarry waste). However, elements made with this technology have two critical aspects: the first on surface texture (Fig. 13) and the second on compressive strength. Currently, modules produced with these mixtures are suitable for creating non-structural elements. While Pietra di Vicenza has an average compressive strength ranging from 19.8 to 26.6 MPa (Uni 9724/3), artificial stone can withstand compressive forces up to 20 MPa (Elsayed et alii, 2022).

The second 'evident' critical aspect concerns the surface roughness of the seat produced with MA: as it is a layer-by-layer deposition of a powder mixture, the final result has a very rough, non-glossy, and compact surface compared to natural stone. It has a uniform colour (according to the marble powder used) and lacks natural stone's typical veins and hues. For this reason, if the mixture is intended as a substitute for stone in products produced with MA, surface treatments must be applied – which, of course, affect the final cost of the product – to make them as smooth and uniform as natural stone.

Conclusions | The analysis conducted thus far, although empirical in nature, reveals the potential applications of Additive Manufacturing in the fields

of Architecture and Design. This potential is evident in the complexity of achievable forms and the economic and environmental benefits they offer. The ability to reuse quarry waste and reintegrate it into a highly technological production cycle with low environmental impact and reduced costs aligns with the market demands for product customisation, surpassing the logic and costs associated with large-scale industrial production.

The results obtained from recent research encourage the transfer of experimentation to the production of non-structural modular elements, wall cladding (including decorative), or urban furnishings. However, there are areas for improvement concerning surface finish and mechanical performance of the printed material. Another critical aspect to consider is the recyclability of the final product, given that it is a composite material. The prospects for the disposal and transformation of components should also be evaluated.

At present, experiments for powder recovery from stone waste are multiplying, also using other 3D printing technologies and testing different mixtures of materials, including in the form of slurries. Appearing noteworthy, for example, is the artificial stone module produced by Wasp in collaboration with the Polytechnic University of Bari (Fig. 14), made with a mixture of lime and marble powder¹² and used experimentally in the Da Vinci Bridge, designed by the team of Prof. Giuseppe Fallacara¹³, as well as other experiments exhibited within Marmomac Meets Academies 2023 in Verona and made with different formulations and digital technologies, such as Dustin White's Technovault prototypes (Fig. 15) and Butterfly Wing by Nicola Parisi and Francesco Fieni (Fig. 16).

Research is developing on multiple levels, involving different technologies and materials, with expectations of applications and replicability at various scales. This ranges from small replicable modules to unique elements and even structural components, using mixtures containing processing powder or sludge with improved mechanical performance. Nevertheless, further exploration is required to address issues related to the Life Cycle Assessment (LCA) of products and components (of varying shapes and uses) manufactured using Additive Manufacturing and quarry waste recycling. Additionally, in the absence of reference standards, the study of specific regulations for formulations and performance is needed.

In conclusion, it can be hypothesised that in the near future, quarry waste recycling can evolve throughout the entire supply chain, with blends and mixtures that allow for the use of waste, dust, and sludge in various production sectors and applications. It should be emphasised that these products should not be viewed as substitutes for stone elements but rather as complementary, serving the purpose of recovering 80% of waste material with an outlook of innovation and circularity.

Acknowledgements

For the Arcadia project, we would like to express our gratitude to: F. Lasala and L. Favaron, the designers for the photos; A. Italiano (Desamanera Srl) and F. Gobbin (University of Padova) for technical information, production data, texts, and technical-scientific consultation; D. Marconi for the SM production data (Scuola del Marmo, Verona); Wasp, the company, for the images and technical texts related to Tecla and the DaVinci Bridge voussoir; DUS Architect studio for the images of the EU Pavilion; and finally, Emerging Objects / Ronald Rael + Virginia San Fratello for the images of Saltygloo.

Notes

1) Project D.A.M.N. Design: F. Lasala and L. Favaron; Lecturers: K. Gasparini, F. Piccolino Boniforti, L. Palmeri and S. Papadopoulos.

2) The concept was expounded by Max Bill in his speech at the opening of the academic year at the ULM School in 1953, within the programmatic objectives (Lindinger, 1988; Erlhoff, 1988).

3) For more information, see the webpage on 'marble quarry waste recovery plants': sinopesrl.com/plant-recovery-sludge-quarries-marble [Accessed 06 October 2023].

4) Information about TECLA Press Kit can be found at: 3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/ [Accessed 06 October 2023].

5) More information can be found at: archilovers.com/projects/183950/dubai-s-museum-of-the-future-office-building.html#info [Accessed 06 October 2023].

6) More information about the first 3D printed building can be found at: archiportale.com/news/2016/05/architettura/inaugurato-a-dubai-il-primario-edificio-stampato-in-3d_52177_3.html [Accessed on 06 October 2023].

7) More information about the Pavilion Europe Building (2015) can be found at: houseofdus.com/work/#project-europe-building [Accessed on 06 October 2023].

8) The process is described very comprehensively in the contribution of Elsayed et alii (2022); the research group at the University of Padua tested a powder mixture consisting of magnesium oxide and monopotassium phosphate with different aggregates, with varying sizes of particles depending on the type of printer used (Gobbin et alii, 2021).

9) D-slicing, Desamanera srl, Rovigo (IT).

10) Reports provided by Filippo Gobbin (University of Padua) and Antonino Italiano (Desamanera Srl) to the Author on the dates of 16/02/2023 and 10/10/2023.

11) Information and data were provided by Dario Marconi (Marble School Verona) to the Author on 12/01/2023.

12) Information provided by Wasp to the Author on 09/10/23.

13) The project team, coordinated by Prof. G. Fallacara, consists of N. Parisi, I. Cavaliere and A. V. Graziano.

References

Baratta, A. F. L. (2021), "Dalle politiche per la circolarità delle risorse alla strategia zero rifiuti | From resource circularity policies to the zero-waste strategy", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 9, pp. 32-41. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/932021 [Accessed 06 October 2023].

Baratta, A. F. L., Andreotti, J., Trulli, L. and Calcagnini, L. (2023), "L'innovazione di prodotto per la transizione ecologica – Il riciclo del laterizio e del vetro | Product innovation for the ecological transition – Brick and glass recycling", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 227-236. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13192023 [Accessed 06 October 2023].

Ciribini, G. (1984), *Tecnologia e progetto – Argomenti di cultura tecnologica della progettazione*, Celid, Torino.

Di Roma, A., Scarcelli, A. and Minenna, V. (2019), "RE-STONED – Dalla Polvere di Scarto alla Pietra Sostenibile | RESTONED – From Waste Material to Sustainable Stone",

in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 183-190. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5212019 [Accessed 06 October 2023].

EEA – European Environment Agency (2023), *Tracking waste prevention progress – A narrative-based waste prevention monitoring framework at the EU level*, EEA Report no 2. [Online] Available at: eea.europa.eu/publications/tracking-waste-prevention-progress [Accessed 06 October 2023].

Esposito De Vita, G. (ed.) (2009), *Luigi Moretti e la Fondazione de La Rocca – Urbanistica e Ricerca Operativa*, Plan, Roma.

Elsayed, H., Gobbin, F., Picicco, M., Italiano, A. and Colombo, P. (2022), "Additive manufacturing of inorganic components using a geopolymer and binder jetting", in *Additive Manufacturing*, vol. 56, article 102909, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.addma.2022.102909 [Accessed 06 October 2023].

Erlhoff, M. (1988), "Conversazione con Max Bill", in Lindinger, H. (ed.), *La Scuola di Ulm – Una nuova cultura del progetto (1953-1968)*, Costa & Nolan, Genova, pp. 65-68.

European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Breque, M., De Nul, L. and Petridis, A. (2021), *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office of the European Union. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2777/308407 [Accessed 06 October 2023].

Gasparini, K. (2017), "Adattività e innovazione nei nuovi sistemi per architetture tessili", in *Tenda In&Out*, vol. 3, pp. 38-45. [Online] Available at: issuu.com/katiagaspariniarchitetto/docs/tenda3-2017 [Accessed 06 October 2023].

Gobbin, F., Elsayed, H., Italiano, A., Adrien, J., Colombo, P. and Maire, E. (2021), "Large scale additive manufacturing of artificial stone components using binder jetting and their X-ray microtomography investigations", in *Open Ceramics*, vol. 7, article 100162, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100162 [Accessed 06 October 2023].

Horvath, M., Trachte, S. and Pardoen, T. (2021), "New circular building composite material to upcycle building wastes", in *Journal of Physics | Conference Series*, vol. 2042, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012167 [Accessed 06 October 2023].

Italian Trade Agency (2021), *Nota di mercato – Settore lapideo*, Miami (US). [Online] Available at: ice.it/it/sites/default/files/inline-files/Nota%20di%20Mercato%20-%20Lapideo%20-%20June%202021.pdf [Accessed 06 October 2023].

Italian Trade Agency (2020), *Nota di mercato – Settore lapideo*, Miami (US). [Online] Available at: ice.it/it/sites/default/files/inline-files/Nota%20di%20Mercato%20-%20Lapideo%20-%20Aprile%202020.pdf [Accessed 06 October 2023].

Jabi, W. (2013), *Parametric Design for Architecture*, Laurence King, London. [Online] Available at: softschool.ac/wp-content/uploads/2019/10/Parametric-Design-for-Architecture-SoftSchool.pdf [Accessed 06 October 2023].

Jongsma, I. (2021), "First resident of 3D-printed concrete house in Eindhoven receives key", in *tue.nl*, 30/04/2021. [Online] Available at: tue.nl/en/news/news-overview/30-04-2021-first-resident-of-3d-printed-concrete-house-in-eindhoven-receives-key [Accessed 06 October 2023].

Lindinger, H. (1988), "Ulm – Leggende e idea vitale", in Lindinger, H. (ed.), *La Scuola di Ulm – Una nuova cultura del progetto (1953-1968)*, Costa & Nolan, Genova, pp. 10-15.

Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen, C. and Dillenburger, B. (2018), "Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges", in *Cement and Concrete Research*, issue 112, pp. 50-65. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.018 [Accessed 06 October 2023].

Marcolli, A. (1978), *Teoria del campo*, vol. 2, Sansoni, Bologna.

Mattioli, G. (2014), "Saltygloo, una scultura di sale", in *La Stampa*, 17/01/2014. [Online] Available at: lastampa.it/cultura/2014/01/17/news/saltygloo-una-scultura-di-sale-1.35936042/ [Accessed 06 October 2023].

Monsù Scolaro, A. (2017), *Progettare con l'esistente – Riuso di edifici, componenti e materiali per un processo edilizio circolare*, FrancoAngeli, Milano.

Montani, C. (2017), *XXVIII Rapporto Marmi e Pietre nel Mondo – 2017 – Marble and Stone in the world*, Aldus, Carrara. [Online] Available at: issuu.com/marmonews/docs/rapporto_2017_screen [Accessed 10 October 2023].

Moretti, L. (1974a), "Structures and Sequences of Spaces", in *Opposition*, vol. 4, pp. 123-139. [Online] Available at: usmodernist.org/OPP/OPP-1974-4.pdf [Accessed 06 October 2023].

Moretti, L. (1974b), "The Value of Profiles", in *Opposition*, vol. 4, pp. 112-122. [Online] Available at: usmodernist.org/OPP/OPP-1974-4.pdf [Accessed 06 October 2023].

Pajonk, A., Prieto, A., Blum, U. and Knaack, U. (2022), "Multi-material additive manufacturing in architecture and construction – A review", in *Journal of Building Engineering*, vol. 45, article 103603, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2021.103603 [Accessed 06 October 2023].

Paolini, A., Kollmannsberger, S. and Rank, E. (2019), "Additive manufacturing in construction – A review on processes, applications, and digital planning methods", in *Additive Manufacturing*, vol. 30, article 100894, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894 [Accessed 09 October 2023].

Russo, D. and Moretti, M. (2020), "Shamballa, il Paradiso può attendere – Come la stampa 3D sostiene il futuro | Shamballa, Heaven can wait – How 3D printing will sustain the future", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 32-43. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/832020 [Accessed 06 October 2023].

Premier, A. (2017), "Il design parametrico per il progetto dei tessuti schermanti", in *TeSS | Tende e Schermature Solari*, n. 2, pp. 8-17. [Online] Available at: issuu.com/alepremier/docs/tess.02.2017_-_premier [Accessed 06 October 2023].

Sposito, C. and Scalisi, F. (2017), "Strumenti e materiali per la fabbricazione digitale in architettura | Instruments and materials for digital manufacturing in architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 1, pp. 143-151. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1222017 [Accessed 06 October 2023].

Turner, B. (2009), "Radiolaria Pavilion by Shiro Studio", in *Dezeen*, 22/06/2009. [Online] Available at: dezeen.com/2009/06/22/radiolaria-pavilion-by-shiro-studio/ [Accessed 06 October 2023].

Turunen, H. (2016), "Additive Manufacturing and Value Creation in Architectural Design, Design Process and End-products", in Herneoja, A., Österlund, T. and Markkanen, P. (eds), *Complexity & Simplicity – Proceedings of the 34th eCAADe Conference*, University of Oulu, vol. 1, pp. 103-111. [Online] Available at: doi.org/10.52842/conf.ecaade.2016.1.103 [Accessed 06 October 2023].

Violano, A., Cannaviello, M. and Del Prete, S. (2021), "Materiali rigenerativi bio-based – Una proposta innovativa per il packaging e i prodotti da costruzione | Bio-based circular materials – Innovative packaging and construction products", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 9, pp. 244-253. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/9242021.

Weinstein, A. (2020), "Creating Superior Customer Value in the Now Economy", in *Journal of Creating Value*, vol. 6, issue 1, pp. 20-33. [Online] Available at: doi.org/10.1177/2394964319898962 [Accessed 06 October 2023].

Wiberg, A., Persson, J. and Ölvander, J. (2019), "Design for additive manufacturing – A review of available design methods and software", in *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, issue 6, pp. 1080-1094. [Online] Available at: doi.org/10.1108/RPJ-10-2018-0262 [Accessed 06 October 2023].

ARTICLE INFO

Received	10 September 2023
Revised	16 October 2023
Accepted	22 October 2023
Published	31 December 2023

MODA E DESIGN MODULARE

Modularità come strategia di design per la sostenibilità

FASHION AND MODULAR DESIGN

Modularity as a design strategy for sustainability

Daria Casciani

ABSTRACT

La moda occupa un posto importante nella società odierna non solo per la produzione di indumenti e del loro impatto a fine vita, ma anche per le dinamiche economiche, culturali e sociali che determina. La progettazione modulare è una strategia utile per creare sistemi complessi a partire da moduli configurabili, separabili e adattabili che può influenzare la sostenibilità. Attraverso la revisione della letteratura scientifica integrata con lo studio di casi provenienti dal mondo professionale, il contributo presenta una categorizzazione delle attuali implementazioni del design di moda modulare, evidenziandone l'architettura di sistema e descrivendo opportunità e limiti in termini di sostenibilità ambientale, economica, culturale e sociale. Dall'analisi emerge la necessità di un approfondimento multidisciplinare del tema attraverso lo studio di nuovi modelli di business e tecnologie dell'Industria 4.0 tramite un approccio guidato dal design che si occupi della progettazione di prodotti e servizi ma anche dei comportamenti di consumo.

Fashion occupies an essential place in today's society not only because of the production of garments and their impact at the end of their life but also because of the economic, cultural and social dynamics it determines. Modular design is a valuable strategy for creating complex systems from configurable, separable and adaptable modules that can influence sustainability. Through the review of scientific literature integrated with case studies from the professional world, this paper categorises current implementations of modular fashion design, highlighting the system architecture and describing opportunities and limitations regarding environmental, economic, cultural and social sustainability. From the analysis emerges the need for a multidisciplinary investigation of the topic through the study of new business models and Industry 4.0 technologies employing a design-led approach that deals with the design of products and services and consumption behaviour.

KEYWORDS

moda modulare, moda e tecnologia, Industria 4.0, modularità, sostenibilità

modular fashion, fashion and technology, Industry 4.0, modularity, sustainability



Daria Casciani, Designer and PhD, is a Researcher at the Department of Design of the Politecnico di Milano (Italy), where she teaches Fashion-Tech Design and Advanced Manufacturing for Sustainable Fashion. Her research activity investigates the influence of advanced manufacturing and technology integration in new sustainable fashion scenarios, systems and solutions. E-mail: daria.casciani@polimi.it

L'industria della moda, e in particolare la produzione di abbigliamento, rappresenta uno dei settori a più alta intensità di risorse, con un forte impatto nella gestione dei consumi e del fine vita degli indumenti. Nella sua attuale configurazione lineare il sistema moda crea flussi di rifiuti, uno dei quali è costituito dai rifiuti tessili post-consumo (indumenti scartati dal consumatore) che finisce in discarica (Ellen MacArthur Foundation, 2017). Il fenomeno della sovrapproduzione e del sovraconsumo di risorse nella produzione e vendita di capi di abbigliamento impatta severamente le quattro dimensioni interconnesse della sostenibilità ambientale, sociale, culturale ed economica (Brown and Vacca, 2022). Se alcuni studi dimostrano che il 65% dell'impatto ambientale di un abito deriva dalla produzione del tessuto, considerando filo, fibra e tessuto compresi tutti i trattamenti superficiali relativi, Fletcher (2014) ha dimostrato che l'impatto maggiore nella vita di un capo di abbigliamento è generato dopo il suo acquisto, durante l'uso, la manutenzione e lo smaltimento.

In particolare il fine vita di un abito attraverso riuso o riciclo è ad oggi ancora limitato a iniziative locali e servizi specifici volti ad attuare modelli aziendali positivi per la circolarità e per rigenerare le economie locali (Kasper and Stroomer, 2021); in tal senso estendere la vita attiva di un capo e fare in modo che sia facilmente disassemblabile e riciclabile a fine vita è considerata una delle più efficienti strategie per ridurre gli impatti ambientali della moda (McLaren et alii, 2016; Kasper and Stroomer, 2021). Di conseguenza è chiaro che le scelte attuate durante le fasi di progettazione siano la causa dell'80% dell'impatto ambientale dei prodotti moda, influenzando profondamente la catena di fornitura e valore (Ballie and Woods, 2018).

Per guidare un cambiamento positivo nel settore moda, la Ellen MacArthur Foundation (2013) ha sottolineato che le strategie progettuali verso la moda trasformabile possano essere considerate estremamente utili per lo sviluppo sostenibile e circolare del settore. Il 'design trasformabile' consente di operare modifiche funzionali e/o estetiche ai capi, favorendo la multifunzionalità degli stessi, potenziando le caratteristiche esistenti o favorendone di nuove (Lee, Tufail and Kim, 2016), attraverso attività di decostruzione e ricostruzione che rendono il capo continuamente plasmabile. All'interno della categoria degli abiti trasformabili Koo (2012) identifica elementi modificabili quali colore e modello, taglia e vestibilità, silhouette, tipo di capo e dettagli e definisce il 'design modulare' una delle possibili modalità con cui rendere trasformabile un capo. L'abbigliamento modulare è costruito utilizzando parti che, combinate in vario modo tra di loro, offrono la possibilità al consumatore di trasformare il capo durante il suo utilizzo.

Alla luce di quanto premesso, il contributo vuole proporre una sistematizzazione del design della modularità nel sistema moda per come è stato applicato all'interno dei contesti di ricerca e nel mondo industriale, attraverso una ricostruzione delle caratteristiche principali dell'architettura modulare adottata (moduli, configurabilità e organizzazione, interdipendenza di sistema e interfaccia), del livello di attuazione e scalabilità raggiunto e, infine, dei materiali e delle tecnologie di produzione utilizzate.

Delineando lo stato dell'arte della ricerca in ambito accademico e industriale si vuole evidenziare quali siano stati i maggiori approcci alla progetta-

zione modulare e soprattutto i relativi limiti e opportunità, comparando studi teorici e applicazioni pratiche e ampliando i confini della progettazione dal prodotto al sistema / servizio attraverso il supporto derivato dall'utilizzo di tecnologie proprie dell'Industria 4.0. Le potenzialità per sviluppi futuri della moda modulare individuate in questo contributo possono fornire indicazioni su percorsi di innovazione nei processi di design e produzione di capi di abbigliamento di interesse per l'accademia e l'industria, facilitando il dialogo multidisciplinare tra gli operatori del settore verso una trasformazione più sostenibile.

La progettazione modulare | La modularità è una strategia progettuale utilizzata per creare sistemi complessi utilizzando componenti e sottosistemi indipendenti (moduli), configurabili tra di loro attraverso interfacce standard tali per cui la modifica di un modulo non implichi alcun danno o criticità agli altri, ma anzi determini più funzionalità alternative nel corso del tempo (Tseng and Wang, 2014). La funzionalità complessiva di un prodotto modulare è infatti suddivisa in sottofunzioni dei singoli componenti la cui assemblabilità e disassemblabilità non deve alterare l'operatività del prodotto.

La progettazione modulare garantisce la generazione di una varietà / diversità di prodotti le cui componenti modulari possano essere facilmente sostituite e aggiornate nel tempo: ciò richiede quindi una progettazione strategica sia delle fasi di produzione che di consumo e una organizzazione più efficiente di progetti e processi complessi. Di conseguenza, un prodotto modulare deve essere concepito nelle prime fasi di ideazione e sviluppo considerando le implicazioni nei suoi quattro stadi successivi fondamentali, ovvero pre-produzione, produzione, uso e fine vita. Al contempo, Bonvoisin, Halstenberg, Buchert e Stark (2016) suggeriscono che la progettazione modulare possa influenzare positivamente le tre dimensioni della sostenibilità economica, ecologica e sociale, influenzando l'intero ciclo di vita del prodotto.

L'architettura di un prodotto modulare è definita sostanzialmente dai moduli e dalle relazioni funzionali, fisiche ed estetiche tra gli stessi (Ulrich, Eppinger and Yang, 1995); inoltre il sistema di interfacce volte a offrire configurabilità e varietà determina la capacità di formare una famiglia / sistema di prodotti svilupparli aventi una piattaforma comune (Meyer and Lehnerd, 1997). Il design modulare nella moda caratterizza un capo d'abbigliamento composto da moduli (parti / unità elementari) che possono essere assemblati / disassemblati attraverso diverse interfacce o sistemi di connessione per formare una collezione (sistema / famiglia) di capi facilmente modificabili per adattarsi a esigenze funzionali-performative e/o estetiche che riguardino i gusti soggettivi oppure derivate dalle tendenze del momento (Niinimäki and Hassi, 2011; Koo, Dunne and Bye, 2014).

Obiettivi della ricerca e approccio metodologico | Il presente contributo presenta una categorizzazione delle realizzazioni del design modulare applicato alla moda, evidenziando quali approcci progettuali alla modularità sono stati attuati, a partire dalla ricerca di Nadasbas e Cileroglu (2017); i due studiosi hanno individuato sei diversi approcci alla progettazione modulare: modularità per condivisione di componenti, modularità per

scambio di componenti, modularità 'cut-to-fit', modularità 'bus', modularità sezionale e modularità 'mix' (Fig. 1). Sebbene siano largamente impiegati in altri settori, questi approcci progettuali alla modularità risultano ancora poco esplorati in maniera sistemica nel settore moda.

L'analisi condotta mira a comprendere l'architettura principale del sistema modulare adottato, costituito principalmente da componenti (moduli), interfacce e standard di configurabilità ovvero elementi di connessione che consentono la relazione di assemblaggio e disassemblaggio. A tale scopo la relazione sistemica di interdipendenza tra gli elementi geometrici è analizzata per comprendere il livello di comunanza e varietà volto a creare una famiglia di capi o collezione con particolari caratteristiche funzionali ed estetiche. Inoltre lo studio indaga sul rapporto utente / capo d'abbigliamento, focalizzandosi sull'usabilità / praticità del sistema modulare e sulle modalità di interazione previste in fase progettuale.

Lo studio si basa su una ricerca desk che prevede una revisione della letteratura sul tema della progettazione modulare nell'ambito moda con integrazione di casi di studio multipli provenienti dal mondo professionale (Yin, 2014; Gustafsson, 2017). L'integrazione della ricerca in ambito accademico con i casi studio mira a mappare le pratiche esistenti nella progettazione di sistemi modulari di prodotti, servizi correlati e processi di progettazione, prototipazione e produzione di capi di abbigliamento moda. Dal confronto di prototipi di studio, prototipi di ricerca e prodotti industrializzati si vuole quindi mettere in evidenza la potenzialità del design modulare a livello di creatività e di trasformazione nei processi dall'ideazione alla produzione, i limiti attuali e le barriere allo sviluppo come pure l'apporto di nuove tecnologie di produzione per lo sviluppo di capi modulari. Al contempo lo studio descrive le opportunità e i limiti in termini di sostenibilità in una dimensione olistica. La ricerca, condotta tra giugno e settembre 2023, ha riveduto la letteratura utilizzando i motori di ricerca di Scopus e Science Direct attraverso una gamma specifica di parole chiave in inglese: 'Industry 4.0', '4IR', 'Fashion-Tech', combinate con almeno uno dei termini settoriali 'fashion', 'textile', 'clothing', 'apparel', e con termini specifici relativi alla modularità 'transformative', 'trasformabile', 'adaptable', 'modular', 'modular design', 'modularity', e 'sustainability'. Dalla ricerca sono emersi 46 articoli su riviste scientifiche e tesi di laurea o di dottorato. I criteri di selezione e scrematura di questa preliminare raccolta sono stati la coerenza con il tema della modularità nel settore moda, la solidità metodologica del contributo presentato e i riferimenti impliciti o espliciti al tema della sostenibilità.

La ricerca di casi multipli è stata condotta sul web, attraverso la combinazione delle stesse parole chiave sui motori di ricerca di Google e Google Scholar. Dei 31 casi studio trovati sono stati selezionati soltanto gli esempi prodotti, messi in commercio e rilevanti rispetto a originalità, importanza e innovazione di prodotto / servizio apportata. Infine i testi scientifici e i casi studio più importanti sono stati raggruppati per tipologia modulare secondo la classificazione di Nadasbas e Cileroglu (2017) e riportati in Tabella 1.

Il capo come modulo trasformabile in collezioni continue | Una collezione continua e modulare

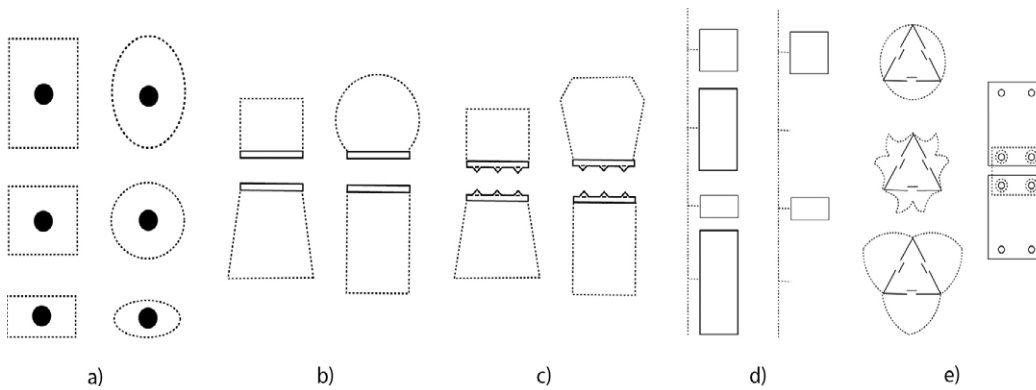


Fig. 1 | Approaches and models of modularity in fashion: a) Modularity by sharing components; b) Modularity model by exchanging components; c) Modularity model by exchanging components; d) Bus-type modularity model; e) Sectional modularity model.

considera ogni capo di abbigliamento progettato come parte di un unico sistema aggiornabile, seguendo il modello di modularità per condivisione di componenti. I moduli / capi possono essere trasformati e abbinati offrendo due o più stili funzionali e/o estetici attraverso vari metodi di manipolazione da parte dell'utente come stratificazione, avvolgimento, legatura, arrotolamento, torsione, piegatura e raccolta. In un sistema modulare di questo tipo non c'è connessione o interfaccia fisica delle componenti, mentre la trasformabilità e multifunzionalità di questi abiti sono demandate al consumatore. La personalizzazione è quindi parzialmente pre-progettata ma può essere creativamente manipolata dal consumatore finale, il quale può accrescere la propria individualità tramite la diversificazione della modalità di vestire.

Un esempio di questa tipologia di modularità è Units / Multiples di Sandra Garratt¹, costituita da moduli / capi adattivi e in taglia unica implementati recentemente in SGDBOX, attraverso l'uso di jersey di cotone biologico più facilmente riciclabile a fine vita (Fig. 2). Lo stesso approccio è adottato nella 'capsule collection' Omdanne² (2016) di Solve Studio composta da tre capi di abbigliamento (T, R ed E) che possono essere trasformati in dieci stili e capi differenti, ovvero tute, abiti, bluse, giacche e pantaloni per supportare diverse occasioni d'uso: la trasformabilità è garantita attraverso avvolgimento e piegatura dei capi che vengono fermati attraverso l'uso di bottoni metallici. L'utente è supportato da un video tutorial esplicativo per ottenere i diversi stili progettati e da suggerimenti per la cura, il lavaggio e la manutenzione del capo. Interamente realizzati con Lyocell Tencel®, i capi risultano totalmente biodegradabili, e quindi circolari. Uno sviluppo dello stesso concetto è Refashion CDS, un sistema che si avvale di tre blocchi di tessuto multifunzionali che sono compatibili tra loro per creare circa undici stili riutilizzando il tessuto stesso attraverso lo smontaggio e il rimontaggio dei capi (Dan et alii, 2023; Figg. 3, 4).

La modularità funzionale di parti di cartamodello tradizionale | Fondato sul concetto di modularità per scambio di componenti, il progetto di capo modulare funzionale è caratterizzato dalla sostituibilità di parti di cartamodello (moduli) la cui assemblabilità e configurabilità è completamente predefinita in fase di progettazione per assolvere diverse funzioni prestabilite, definire stili intercambiabili o adattarsi a diverse occasioni d'uso.

La configurabilità delle parti avviene attraverso un'interazione semplificata dell'utente mediante cerniere o bottoni quali sistemi di interfaccia di separazione e assemblaggio di maniche, cappucci o fodere removibili allo scopo di adattare i capi a diverse condizioni climatiche e atmosferiche o ottenere una diversificazione della lunghezza di gonne, giacche, abiti e pantaloni per diversificare stile o indossabilità in relazione a diverse occasioni d'uso (Peter, n.d.).

La modularità funzionale nel settore moda non è un concetto moderno ma una pratica antica utilizzata per la produzione di abiti più longevi e trasformabili. Le giacche da uomo imbottite comunemente indossate dal XIV al XVII secolo erano spesso caratterizzate da maniche e peplu separabili e modificabili per ottenere una maggiore decorazione (Watt, 2012), mentre il corpetto della metà del XVII secolo aveva maniche staccabili a seconda del desiderio stilistico o delle necessità funzionali. Ulteriori elementi rimovibili fanno parte degli abiti di inizio XVIII secolo, quando divenne di moda abbinare il modello del gilet con i polsini del cappotto, quest'ultimi progettati come separabili dal cappotto attraverso ganci e occhielli, rendendo così possibile il disassemblaggio per lavaggi più frequenti, per sostituzione causa usura o per ragioni estetiche (Gwilt, 2014).

Esempi contemporanei di questa tipologia di modularità sono alcune giacche trasformabili e inclusive come le giacche e cappotti di EDIT+³ (2020) per cui si possono ottenere 8 modelli diversi a seconda delle dimensioni del corpo di chi lo indossa (Fig. 5). Anche nelle collezioni di Flavia La Rocca⁴ i capi sono configurabili grazie all'uso di cerniere nascoste per creare abiti, tute, top e gonne, stando attenti alla coerenza delle taglie delle varie componenti selezionate: lo scopo è ottenere 'un guardaroba senza fine' che travalichi le stagionalità (Fig. 6). Infine Cramer (2014) presenta un top in maglia trasformabile attraverso la separabilità delle maniche fissate alle spalle con bottoni a pressione. Il top è dotato di protezioni sotto le ascelle per le macchie causate da sudore e deodorante ed è rifinito con colletto, polsini e orlo di un tessuto a contrasto rimovibili e sostituibili quando usurati mediante macchine da cucire domestiche. In questo caso la disassemblabilità implica abilità degli utenti nel cucito.

La modularità basata su autoassemblaggio di parti di cartamodello tradizionale | Un approccio

di modularità di parti di cartamodello che implichi una maggiore interazione con l'utente è proposto attraverso interfacce e meccanismi di interconnessione costituiti da tessuto direttamente ricavato nel modulo che il consumatore può assemblare manualmente per confezionare il capo desiderato. Tale scelta deriva dal voler ingaggiare attivamente l'utente nella realizzazione del capo, creando un legame emotivo con lo stesso, allo scopo di influire positivamente sul suo attaccamento e quindi aumentare l'uso e la durata di vita.

Un esempio pionieristico è The Post-Couture Collective⁵ (2015), collezione di abiti modulari costituiti da parti di cartamodello da assemblare autonomamente senza il bisogno di macchine da cucire ma mediante connettori in tessuto ricavati sul modulo stesso: il prodotto è realizzato su richiesta dell'utente, quindi personalizzabile sulle sue misure corporee, scaricabile digitalmente dal sito, realizzabile in kit da assemblare poi manualmente, e prodotto tramite taglio laser di un materiale simile al neoprene realizzato in PET da bottiglie riciclate (Fig. 7).

Self-Assembly⁶ (2022) disegna e produce in maniera completamente automatizzata e digitale un kit per la costruzione di indumenti pronti per l'assemblaggio manuale da parte degli utenti grazie ad una speciale tecnica di legatura dei connettori ricavati dal taglio laser del cartamodello. Simile, ma con un intento ludico ed educativo, è poi l'approccio di Puzzleware / Convertibles di Almaborealis⁷ (2021), un sistema modulare di capi in maglia di lana colorata che i bambini possono cucire manualmente inserendo l'ago nei fori presenti sulle diverse porzioni di cartamodello (Figg. 8, 9).

Gli abiti derivati da blocchi destrutturati modulari | La separazione e ricomposizione di moduli destrutturati per qualità geometriche e capacità di riconfigurarsi in funzioni alternative e non costanti è un altro esempio sperimentale di modularità. L'approccio progettuale è molteplici e può essere caratterizzato da un elemento base fisso che si interfaccia con gli altri elementi (modularità di tipo 'bus') oppure attraverso blocchi modulari che possano essere separati e ricomposti con uguale e diversa funzionalità (modularità 'mix'). La configurabilità non richiede competenze di cucito, ma si basa su interfacce meccaniche come zip, bottoni o connettori che assicurano un'interazione semplificata per promuovere la sperimentazione creativa da parte del consumatore; la configurabilità è dunque progettata dal designer affinché ci sia maggiore potenzialità creativa nella ricomposizione dei moduli da parte dell'utente.

Rahman e Gong (2016) presentano un prototipo trasformabile esemplificativo di questo approccio, composto da 39 componenti modulari configurabili in diversi stili e secondo diverse funzionalità attraverso l'interfaccia meccanica metallica delle cerniere, ritenute più pratiche e sicure (Fig. 10). Diversamente, la collezione autunno-inverno 2020 di Anrealage⁸ (2020) è descritta come 'pick 'n' mix hybrids' ed è caratterizzata da blocchi colorati, modulari e assemblabili. Il processo creativo ha prima lavorato sulla composizione attraverso abbinamenti cromatici e morfologici senza considerare il corpo e, in una seconda fase, le combinazioni sono state sovrapposte all'anatomia umana per generare dei capi di abbigliamento.

Resources	Authors	Year	Title	Sharing Components Modularity	Swapping Components Modularity	Cut-to-Fit Modularity	Bus Modularity	Sectional Modularity	Mix Modularity
Scientific papers	Hur and Thomas	2011	Transformative Modular Textile Desig			✓		✓	
	Cramer	2014	Wear, repair and remake: the evolution of fashion practice by design		✓				
	Rahman and Gong	2016	Sustainable practices and transformable fashion design: Chinese professional and consumer perspectives				✓		✓
	Li, Chen and Wang	2018	Modular design in fashion industry			✓		✓	
	Spahiu, Canaj and Shehi	2020	3D printing for clothing production			✓		✓	
	Chen	2020	Vanishing Ice					✓	
	Chen and Lapolla	2021	The Exploration of Geometric Modular System in Textile and Apparel Design			✓		✓	
	Tufan Tolmaç and Ismal	2022	A new era: 3D printing as an aesthetic language and creative tool in fashion and textile design					✓	
	Chen	2022	Modular Illusion					✓	
	Dan, Ciortea and Mayer	2023	The refashion circular design strategy: changing the way we design and manufacture clothes	✓		✓			
Case studies	Sandra Garratt	1979	Units / Multiples	✓					
	Refinity and Berber Soepboer	2009	Fragment Textiles			✓		✓	
	Danit Peleg	2015	3D-printed ready-to-wear clothing lines			✓			
	Martijn van Strien	2015	The Post Couture Collective		✓	✓			
	Bolor Amgalan	2015	Metabolism					✓	
	Sandra Garratt	2016	SGDBOX	✓					
	Solve Studio	2016	Omdanne	✓					
	Flavia La Rocca	2016	Guardaroba senza fine		✓	✓			
	Yuima Nakazato	2017	Freedom			✓		✓	
	Jean Sung	2020	EDIT+		✓				
	Anrealage	2020	'pick 'n' mix hybrids'				✓		✓
	Almaborealis	2021	Puzzleware / Convertibles		✓				
	Julia Koerner	2021	Arid			✓			
	N.d.	2022	Self-Assembly		✓				
	Fabricademy	n.d.	Open Source Circular Fashion Catalogue						✓

Tab. 1 | Synoptic table on the scientific literature and case studies selected in the contribution.

La diversa configurabilità dei moduli è determinata da un'interfaccia metallica costituita da un sistema di bottoni automatici che permette di staccare e riorganizzare i moduli. A livello progettuale è dunque necessario far coincidere la lunghezza di alcune cuciture su tutto il corpo e su vari tipi di indumenti e tessuti per garantire che tutti i pezzi possano essere spostati e ricombinati: un colletto

può diventare un polsino, mentre un corpetto si può trasformare nella parte inferiore di una gonna (Fig. 11). Infine la collezione modulare Arid⁹ (2021) di Julia Koerner è composta da 38 parti modulari combinabili tra loro per formare un abito completo oppure, grazie a diverse combinazioni configurabili, giacche e gonne di diverse lunghezze. Attraverso la tecnologia di stampa 3D Polyjet di Stra-

tasys, la resina viene depositata su un tessuto traforato e questo permette leggerezza, vestibilità, traspirabilità e comfort. La stessa tecnologia permette di variare le cromie del capo, creando estetiche contemporanee ricche e dettagliate. Il posizionamento dei moduli è basato sulla disposizione dei muscoli e sull'anatomia di un corpo femminile, mentre l'interfaccia di connessione tra i vari moduli è

costituita da connettori stampati direttamente sul tessuto in 3D. In questo caso il sistema è pensato per consentire un'adattabilità personalizzata degli indumenti grazie a un processo di ingegnerizzazione del capo a partire da scansione 3D del corpo di chi lo indosserà (Fig. 12).

Gli abiti destrutturati in microunità geometriche modulari

La modularità geometrica (Li, Chen and Wang, 2018) caratterizza capi di abbigliamento basati su tassellazione modulare ripetuta in cui l'unità modulare sia minima in forma di triangolo, quadrato o esagono la cui interconnessione avviene per mezzo di connessioni tessili che sono integrate all'interno dei moduli stessi mediante tagli e linguette. Basato su un approccio modulare sezionale, ogni elemento modulare utilizza un insieme comune di interfacce per connettersi. La configurabilità dei moduli è progettata per poter creare strutture tessili planari o tridimensionali estremamente flessibili atte a formare molteplici capi da indossare; infatti la configurabilità in uno specifico capo non è predeterminata, ma deriva dalla manipolazione e strutturazione creativa delle microunità geometriche modulari che può essere più o meno demandata al consumatore.

I materiali maggiormente utilizzati in questo approccio sono tessuti artificiali, come il feltro e il neoprene, che non tendono a sfrangiarsi dopo il taglio attraverso la tecnologia laser e in cui il sistema di interfaccia a incastro e interconnessione tra i moduli è particolarmente resistente a trazione e non si usura facilmente a seguito di frequenti fasi di assemblaggio e disassemblaggio.

Per tale tipologia modulare un primo approccio è fornito dal progetto Nomadic Wonderland (Hur and Thomas, 2011) che utilizza il modulo triangolo

inscritto in un cerchio e da cui vengono ricavate le fessure per il sistema di interconnessione tra i moduli. Sullo stesso tema Chen e Lapolla (2021) hanno elaborato unità modulari basate su triangolo ed esagono con interfacce geometricamente più complesse realizzabili attraverso il taglio laser; quest'ultimo permette sì di creare maggiori dettagli ma costringe all'utilizzo di materiali artificiali per limitare la sfrangiatura post-taglio (Fig. 13).

Ulteriori esplorazioni materiche sono effettuate nel progetto Metabolism¹⁰ (2015) di Bolor Amgalan, i cui materiali tessili dei moduli sono stati realizzati ad hoc incollando diversi strati per ottenere caratteristiche funzionali ed estetiche non convenzionali, coniugando comfort, estetica e struttura; tuttavia i moduli realizzati risultano più difficili da gestire a fine vita del prodotto perché difficilmente separabili. Fragment Textiles¹¹ (2009) utilizza una tassellazione formalmente duplice, quadrato e stella che si intersecano sulla base di principi matematici e geometrici realizzando molteplici composizioni formali e dimensionali.

Ulteriori esplorazioni formali sono collezionate nell'Open Source Circular Fashion Catalogue¹² (n.d.), una piattaforma di archivio di progetti concettuali sul tema della modularità geometrica e della circolarità realizzabili attraverso prototipazione e manifattura additiva e sottrattiva. A questo proposito la combinazione di compiti che possono essere svolti solo dalle macchine, come la stampa 3D, e di quelli che possono essere svolti solo dalle mani dell'uomo, come l'assemblaggio delle componenti modulari, dà vita a un tipo di abbigliamento totalmente nuovo nella collezione AW 2017-18 Freedom¹³ (2017) di Yuima Nakazato.

Il designer giapponese utilizza un approccio matematico digitale per calcolare il numero di unità

modulari necessario per costruire il capo su misura per ogni singolo individuo: le singole unità modulari vengono tagliate a macchina mentre l'abito tridimensionale viene assemblato manualmente attraverso un sistema di connessione stampato in 3D che richiede operazioni di inserimento in asole di tessuto. Tramite questo approccio si possono realizzare diversi modelli, facendo coesistere materiali diversi nello stesso capo (Fig. 14).

Infine i moduli possono essere ottenuti direttamente dalla stampa 3D come nei progetti di Danit Peleg¹⁴ (2015), Spahiu, Canaj e Shehi (2020) e Tufan Tolmaç e Ismal (2022) che sfruttano la limitata dimensione del piano di stampa 3D della tecnologia FDM e congiungono i moduli attraverso una penna da stampa 3D o mediante il calore del saldatore / ferro da stiro, rendendo i moduli indivisibili una volta assemblati (Fig. 15). Diversamente Chen (2022) propone un sistema modulare con stampa 3D e la forma di un fiore a sei petali, le cui fessure funzionano da sistema di assemblaggio e disassemblaggio manuale.

Riflessioni conclusive per una modularità supportata da creatività, tecnologia e sostenibilità

Il risultato dell'analisi condotta presenta la moda modulare come strumento strategico di ricerca e sviluppo in ambito accademico e in piccole aziende, mancando una sua diffusione su larga scala industriale. Le barriere alla diffusione e scalabilità della moda modulare sono individuate nella necessaria trasformazione dei processi di design e produzione, dell'estetica dei capi, dei comportamenti di uso e consumo dell'utente finale e dei modelli di business delle aziende (Peter, n.d.). Al contempo la ricerca rivela che le nuove tecnologie dell'Industria 4.0 possono potenziarne la fattibilità

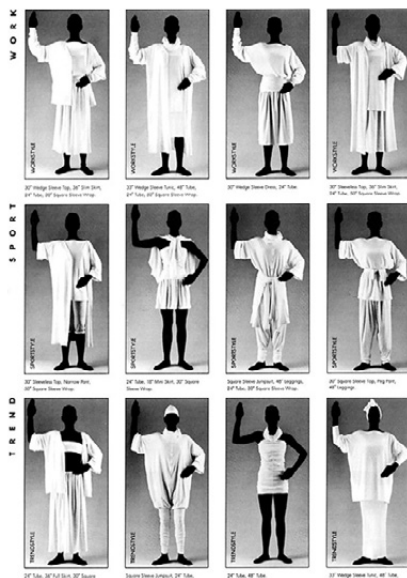


Fig. 2 | Units / Multiples by Sandra Garratt (credit: S. Garratt, 2016).

Fig. 3 | Omdanne by Solve Studio (credit: Solve Studio, 2016).

Fig. 4 | Refashion CDS (source: Dan et alii, 2023).

Fig. 5 | Transformable jacket by EDIT+ (credit: EDIT+, 2020).

produttiva e l'interoperabilità tra gli attori della catena di approvvigionamento.

In termini di sostenibilità ambientale la moda modulare risulta essere una strategia utile a sfruttare meglio le risorse tessili e a prolungare la durata di vita di tessuto e capo, migliorando il rapporto tra gli indumenti e gli utenti allo scopo di sviluppare un attaccamento emozionale contrapposto all'obsolescenza psicologica da cui deriva l'odierno sovraconsumo (Chapman, 2009). Inoltre promuovendo l'interazione prolungata con il capo durante l'uso tramite la sostituzione di componenti critiche e usurate, si attivano cicli multipli di riutilizzo che valorizzano la durata e la cura del capo prima che, in estrema ratio, lo stesso venga riciclato o conferito in discarica (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

I casi studio analizzati dimostrano che la disassemblabilità e la riciclabilità a fine vita sono possibili solo mediante una scelta oculata di tessuti mono-materici per i singoli moduli. Tuttavia, se un'interfaccia di connessione tra i moduli costituita da accessori metallici (come bottoni e zip) da un lato rende più agili e veloci i processi di configurabilità dei prodotti, dall'altro crea una più complessa gestione della fase di disassemblaggio e riciclo dell'indumento a fine vita, inficiando la circolarità del modulo e del tessile. Laddove diversamente il montaggio è manuale ed è lasciato all'utente finale attraverso kit da auto-assemblare o attraverso capi da trasformare, il sistema di interfaccia di connessione modulare risulta più sostenibile e circolare; in questi casi risulta evidente la necessità di limitare la complessità costruttiva dei capi e guidare l'utente nell'assemblaggio attraverso tutorial che rendano l'attività più gradevole per un non addetto ai lavori, anche quando non si ravvisi la necessità dell'utilizzo della macchina da cucire.

Da un punto di vista di sostenibilità sociale, alcuni casi analizzati riportano la modularità a un concetto di inclusività e personalizzazione del capo: attraverso il 'cut-to-fit', presente in quasi tutti i casi analizzati, i moduli diventano elementi modificabili a livello dimensionale per poter essere adattati alle esigenze dell'utente, sia attraverso la tassellazione matematica dei moduli in funzione delle misure antropometriche del singolo sia attraverso una ridefinizione parametrica delle misure dei cartamodelli modulari.

Quindi, in una dimensione di sostenibilità sociale la modularità consente di trasformare l'abito rispetto alle modifiche del proprio corpo, eliminando lo stigma legato al cambiare o non trovare la propria taglia o un capo che si adatta correttamente alla propria fisicità, ma anche rispetto a stile, vestibilità ed ulteriori scelte estetiche. Per attuarla però è necessario che la progettazione modulare per la personalizzazione di massa trovi riscontro nell'interesse dei consumatori e sia supportata da un sistema-servizio basato sulle tecnologie dell'Industria 4.0, in particolare sull'Intelligenza Artificiale e sull'Internet of Things (IoT) per garantire interoperabilità tra i diversi attori della catena di approvvigionamento, la fattibilità a livello produttivo e distributivo e la scalabilità dell'offerta modulare personalizzabile (Bertola and Teunissen, 2018; Dan et alii, 2023).

Progettare la modularità di un capo si rivela un sistema a vantaggio della creatività dei designer perché potenzialmente consente di ottenere forme e stili sempre diversi e più facilmente aggiornabili e modificabili attraverso collezioni diversifi-

cate e flessibili ma continue negli anni e nelle stagioni. Per un effettivo sviluppo dell'approccio modulare si rende necessario un cambio di attitudine alla progettazione, sia in termini strategici che rispetto agli strumenti utilizzati, oltre che a una progressiva modifica delle modalità di prototipazione e produzione; tale cambiamento richiede anche nuove strategie di distribuzione e vendita incentrate su sistemi locali che agevolino il rapporto fidelizzato con l'utente e supportino la sua esperienza di acquisto e d'uso.

Da un punto di vista di sostenibilità culturale questo studio mostra la necessità che il design si occupi anche della progettazione del post-vendita di un capo modulare: è necessario progettare le attività di interazione dell'utente con l'indumento durante la sua vita utile attraverso sistemi e servizi che garantiscano continuità e fidelizzazione, ma anche attività partecipative, toolkit di istruzioni (Hur, 2015), attivando servizi di collegamento tra utente e azienda che al momento sono stati sviluppati solo a livello concettuale (Karrell, 2014; Dan et alii, 2023). In futuro si ravvisa quindi la necessità di mettere in campo strategie che possano agire sulla modifica dei comportamenti degli utenti in fase di acquisto e utilizzo dei capi per educare a una nuova cultura di consumo.

Sebbene i sondaggi sull'opinione dei consumatori rispetto alla moda modulare siano pochi, l'interesse degli intervistati evidenzia apprezzamento per strategie di sostenibilità come la riparabilità, la personalizzazione e la trasformabilità stilistica, cromatica e d'uso (Koo, Dunne and Bye, 2013; Niinimäki and Hassi, 2011); tuttavia mancano ancora studi scientifici che quantifichino i benefici in termini di impatto positivo dato da una produzione di abiti modulari rispetto a una tradizionale (Maldini and Balkenende, 2017). Quali risultanze dei sondaggi, Rahman e Gong (2016) riferiscono di commenti relativi all'estetica, alla praticità e alla complessità nella gestione della trasformazione di un capo modulare; tra i motivi di preoccupazione si segnalano un concetto troppo nuovo per gli utenti e il timore di costi elevati. Per superare tali criticità sono quindi necessari studi che validino l'attaccamento a lungo termine degli utenti a un capo e che confermino la correlazione tra modularità e riduzione dei consumi e dei volumi di produzione.

Altra prospettiva di ricerca potrebbe essere esplorare nuovi modelli di business che possano supportare l'adozione di questo approccio progettuale e produttivo da parte delle aziende moda. È evidente che il mancato sviluppo dei sistemi modulari nel settore derivi anche dalla mancanza di interesse delle aziende per strategie che riducano i consumi e il ritorno economico. Tradizionalmente basata su un sistema lineare, l'industria della moda tende a privilegiare pratiche consolidate piuttosto che a innovare radicalmente i processi che determinano sviluppo, produzione e vendita di un capo (Buchel et alii, 2018); tuttavia a livello teorico la modularità è una strategia che può fidelizzare il cliente finale, generare nuove economie di scala riducendo al contempo gli sprechi e la sovrapproduzione (Kusiak, 1999).

A questo obiettivo concorrono le tecnologie dell'Industria 4.0 che potrebbero semplificare, rendendolo più flessibile, un approccio progettuale e produttivo modulare attraverso l'impiego di strumenti digitali per una più rapida e precisa prototi-



Fig. 6 | Convertible dresses by Flavia La Rocca (credit: F. La Rocca, 2016).

pazione e per ottimizzare la gestione del ciclo di vita dei prodotti (Bertola and Teunissen, 2018); al contempo gli strumenti digitali possono contribuire allo sviluppo di nuovi business basati sulla customizzazione di massa, sia tenendo conto delle misure antropometriche degli utenti sia delle loro scelte tessili, cromatiche, formali e stilistiche, mentre i tag RFID possono essere posti sui moduli per tracciare la vita del prodotto nel tempo. L'analisi dello stato dell'arte ci conferma che non esistono pratiche di questo tipo ma solo proposte di studio e progetti concettuali che si focalizzano sullo sfruttamento delle tecnologie in ottica di modularità, interoperabilità, scambio di dati in tempo reale per promuovere il design della modularità nella moda (Dan et alii, 2023).

I capi modulari sviluppati, prototipati e prodotti per mezzo di stampa 3D presentano vantaggi e svantaggi. Gli elementi modulari stampati hanno maggiore resistenza e durabilità ma anche una peggiore vestibilità, risultando ancora lontani dai parametri di comfort, traspirabilità e leggerezza rag-

giunti nei tessuti tradizionali (Chen, 2020). Il taglio laser è storicamente la tecnologia che ha supportato la maggior parte dei progetti modulari basati su geometrie variabili con micro-unità assemblabili, grazie a un taglio di precisione a partire da un disegno digitale anche complesso. Il taglio laser presenta però limitazioni in quanto i tessuti che vengono tagliati al vivo senza l'uso di cuciture sono tessuti artificiali e tessuti non tessuti che non

sfrangiano dopo il taglio, il lavaggio e numerose manipolazioni. Nel caso in cui si incollino due tessuti per ottenere maggiore comfort e rifinitura dei contorni risultanti dal taglio, purtroppo si crea una criticità sulla circolarità a fine vita del prodotto che diventa poco gestibile rispetto alla disassemblabilità e riciclabilità.

La moda occupa un posto importante nella società odierna non solo per la produzione di indu-

menti e del loro impatto e gestione a fine vita, ma anche per le dinamiche culturali e sociali che influenza: un capo d'abbigliamento non è soltanto costituito da un intreccio di fili ma influenza molteplici fattori economici, etici, culturali e ambientali. In quest'ottica si rende necessario approfondire studi multidisciplinari rispetto alla fattibilità e scalabilità della modularità nel settore moda esplorando nuovi modelli di business, improntati all'uso di tecnologie dell'Industria 4.0 e a un approccio guidato dal design che si occupi della progettazione del prodotto, del servizio ma anche dell'interazione dell'utente con il prodotto durante l'uso.



The fashion industry, particularly clothing production, represents one of the most resource-intensive sectors, substantially impacting garments consumption and end-of-life management. In its current linear configuration, the fashion system creates waste streams, including post-consumer textile waste (garments discarded by the consumer) that ends up in landfills (Ellen MacArthur Foundation, 2017). The overproduction and overconsumption of resources in the production and sale of garments severely impacts the four interconnected dimensions of environmental, social, cultural and economic sustainability (Brown and Vacca, 2022). While some studies show that 65% of the environmental impact of a garment comes from the production of the fabric, considering thread, fibre, and fabric, including all related surface treatments, Fletcher (2014) showed that the most significant impact in the life of a garment is generated after its purchase, during use, maintenance and disposal. In particular, the end-of-life of a garment through reuse or recycling is to date still limited to local initiatives and specific services aimed at implementing positive business models for circularity and regenerating local economies (Kasper and Stroomer, 2021); in this sense, extending the active life of a garment and making sure that it can be easily disassembled and recycled at the end of its life is considered one of the most efficient strategies to reduce fashion's environmental impacts (McLaren et alii, 2016; Kasper and Stroomer, 2021). Consequently, the choices made during the design stages account for 80% of the environmental impact of fashion products, profoundly influencing the supply and value chain (Ballie and Woods, 2018).

To lead positive change in the fashion industry, the Ellen MacArthur Foundation (2013) emphasised that design strategies towards transformable fashion can be considered extremely useful for the sustainable and circular development of the industry. 'Transformable design' allows for functional and/or aesthetic modifications to garments, fostering their multifunctionality by enhancing existing features or encouraging new ones (Lee, Tufail and Kim, 2016) through deconstruction and reconstruction activities that make the garment continuously adaptable. Within the category of transformable clothing, Koo (2012) identifies modifiable elements such as colour and pat-

Fig. 7 | Modular project by The Post-Couture Collective (credit: The Post-Couture Collective, 2015).

Fig. 8 | Self-Assembly (credit: Self-Assembly, 2022).

Fig. 9 | Puzzleware / Convertibles (credit: Almaborealis, 2021).

tern, size and fit, silhouette, garment type and details and defines 'modular design' as one of the possible ways a garment can be modifiable. Modular clothing is constructed using parts that, combined in various ways, offer the consumer the possibility of modifying the garment during its use.

In light of the above, this paper aims to propose a systematisation of modularity design in the fashion system as it has been applied within research contexts and in the industrial world through a reconstruction of the main characteristics of the adopted modular architecture (modules, configurability and organisation, system interdependence and interface), the level of implementation and scalability achieved and, finally, the materials and production technologies used.

By outlining the state of the art in academic and industrial research, the aim is to highlight the significant approaches to modular design and, above all, their limitations and opportunities, comparing theoretical studies and practical applications and expanding the boundaries of design from product to system / service through the support derived from the use of Industry 4.0 technologies. The potential for future developments in modular fashion identified in this paper can provide insights into innovation paths in garment design and production processes of interest to academia and industry, facilitating multidisciplinary dialogue between practitioners towards a more sustainable transformation.

Modular design | Modularity is a design strategy used to create complex systems using independent components and sub-systems (modules), which can be configured with each other through standard interfaces such that modifying one module does not imply any damage or criticality to the others. Instead, it results in more alternative functionalities over time (Tseng and Wang, 2014). The overall functionality of a modular product is subdivided into sub-functions of individual components, whose assembly and disassembly should not alter the operability of the product.

Modular design ensures the generation of a variety / diversity of products in which modular components can be easily replaced and upgraded over time; this purpose requires a strategic design of both production and consumption phases and a more efficient organisation of complex projects and processes. Consequently, a modular product must be conceived in the early stages of design ideation and development by considering the implications in its four critical subsequent stages, i.e. pre-production, production, use and end-of-life. At the same time, Bonvoisin, Halstenberg, Buchert and Stark (2016) suggest that modular design can positively influence the three dimensions of economic, ecological and social sustainability by influencing the entire product life cycle.

The architecture of a modular product is essentially defined by the modules and the functional, physical and aesthetic relationships between them (Ulrich, Eppinger and Yang, 1995); furthermore, the system of interfaces designed to offer configurability and variety determines the ability to form a family / system of developable products having a common platform (Meyer and Lehnerd, 1997). Modular design in fashion characterises a garment composed of modules (elementary parts / units) that can be assembled / disassembled

through different interfaces or connection systems to form a collection (system / family) of garments that can be easily modified to suit functional performance and/or aesthetic requirements that relate to subjective tastes or derived from current trends (Niinimäki and Hassi, 2011; Koo, Dunne and Bye, 2014).

Research objectives (aims) and methodological approach | This paper presents a categorisation of modular design realisations applied to fashion, highlighting which design approaches to modularity have been implemented, starting with the research of Nadasbas and Cileroglu (2017); the two scholars identified six different approaches to modular design: sharing components modularity, swapping components modularity, 'cut-to-fit' modularity, 'bus' modularity, sectional modularity and 'mix' modularity (Fig. 1). Although widely employed in other sectors, these design approaches to modularity are still little explored systematically in the fashion industry.

The conducted analysis aims to understand the central architecture of the modular system adopted, consisting mainly of components (modules), interfaces and configurability standards, i.e. connecting elements that enable the assembly and disassembly relationship. To this end, the systemic relationship of interdependence between the geometric elements is analysed to understand the level of commonality and variety aimed at creating a family of garments or collections with particular functional and aesthetic characteristics. Furthermore, this study investigates the user / garment relationship, focusing on the usability / practicality of the modular system and the interaction modalities envisaged in the design phase.

The study is based on desk research involving a literature review on modular design in fashion, integrating multiple case studies from the professional world (Yin, 2014; Gustafsson, 2017). Integrating academic research with case studies aims to map existing practices in designing modular product systems, related services and processes for designing, prototyping and producing fashion garments. By comparing study prototypes, research prototypes and industrialised products, the aim is to highlight the potential of modular design in terms of creativity and transformation in processes from conception to production, the current limits and barriers to development, as the contribution of new production technologies for the development of modular garments. At the same time, the study describes the opportunities and limits in terms of sustainability in a holistic dimension. The search, conducted between June and September 2023, reviewed the literature using the search engines Scopus and Science Direct through a specific range of keywords: 'Industry 4.0', '4IR', 'Fashion-Tech', combined with at least one of the sector terms 'fashion', 'textile', 'clothing', 'apparel', and with specific terms related to modularity 'transformative', 'transformable', 'adaptable', 'modular', 'modular design', 'modularity', and finally 'sustainability'. The search yielded 46 articles in scientific journals and dissertations. The criteria for selecting and skimming this preliminary collection were consistency with the theme of modularity in the fashion industry, the methodological soundness of the papers, and implicit or explicit references to the theme of sustainability.



Fig. 10 | Modular Collection (source: Rahman and Gong, 2016).

The search for multiple case studies was conducted online by combining the same keywords on Google and Google Scholar search engines. Of the 31 case studies found, the examples selected were the only ones produced, marketed and relevant concerning originality, and product / service innovation provided. Finally, the most pertinent scientific texts and case studies were grouped by modular type according to Nadasbas and Cileroglu's (2017) classification and shown in Table 1.

The garment as a transformable module in continuous collections | An ongoing modular collection considers each garment designed as part of a single upgradeable system, following the modularity model by sharing components. The user can transform and combine modules / garments offering two or more functional and/or aesthetic styles through various manipulation methods, such as layering, wrapping, tying, rolling, twisting, folding and gathering. In such a modular system, there is no physical connection or interface of the components, while the transformability and multifunctionality of these garments are left to the consumer. Customisation is thus partially pre-designed but can be creatively manipulated by the end consumer, who can enhance his or her individuality through the diversification of the mode of dress.

An example of this type of modularity is Sandra Garratt's Units / Multiples¹, consisting of adaptive, one-size-fits-all modules / garments recently implemented in SGDBOX, through the use of organic cotton jersey that is more easily recyclable at the end of its life (Fig. 2). The same approach is adopted in Solve Studio's 'capsule collection' Omdanne² (2016) consisting of three garments (T, R and E) that can be transformed into ten different styles and garments, i.e. suits, dresses, blouses, jackets and trousers to support different occasions of use: transformability is ensured through wrapping and folding the garments, which are fastened through the use of metal buttons. The user is supported by an explanatory video tutorial to achieve the different styles designed and by

tips for care, washing and maintenance of the garment. Made entirely from Lyocell Tencel®, the garments are biodegradable and circular. A development of the same concept is Refashion CDS. This system uses three multifunctional fabric blocks compatible to create around eleven styles by reusing the fabric through the disassembly and reassembly of garments (Dan et alii, 2023; Figg. 3, 4).

Functional modularity of traditional paper pattern parts | Based on the concept of swapping components modularity, the functional modular garment design is characterised by the exchangeability of paper pattern parts (modules) whose assembly and configurability are completely predetermined at the design stage in order to fulfil different predetermined functions, define interchangeable styles or adapt to different occasions of use. The configurability of the parts takes place through simplified user interaction employing zips or buttons as interface systems for separating and assembling sleeves, hoods or removable linings in order to adapt the garments to different weather and atmospheric conditions or to obtain a diversification of the length of skirts, jackets, dresses and trousers in order to diversify style or wearability concerning different occasions of use (Peter, n.d.).

Functional modularity in fashion is not a modern concept but an ancient practice for producing longer-lasting and transformable clothes. Men's padded jackets from the 14th to the 17th century often featured sleeves and peplums that could be detached and altered to achieve more decoration (Watt, 2012), while the mid-17th-century bodice had detachable sleeves according to stylistic desire or functional need. Further removable elements were part of early 18th-century garments when it became fashionable to combine the waistcoat model with coat cuffs, the latter designed as separable from the coat through hooks and eyelets, thus making it possible to disassemble for

more frequent washing, replacement due to wear or for aesthetic reasons (Gwilt, 2014).

Contemporary examples of this type of modularity are some transformable and inclusive jackets such as the jackets and coats by EDIT+³ (2020), for which eight different models can be obtained depending on the size of the wearer's body (Fig. 5). Also in Flavia La Rocca's collections⁴, garments are configurable through the use of concealed zips to create dresses, jumpsuits, tops and skirts, paying attention to the consistency of the sizes of the various components selected: the aim is to obtain 'an endless wardrobe' that transcends seasonality (Fig. 6). Finally, Cramer (2014) presents a knit top that can be transformed by separating the sleeves attached to the shoulders with snap buttons. The top is equipped with underarm protectors for stains caused by sweat and deodorant and is finished with a collar, cuffs and hem of a contrasting fabric that can be removed and replaced when worn using domestic sewing machines. In this case, the disassembly implies users' sewing skills.

Modularity based on self-assembly of traditional paper pattern parts | An approach of modularity of parts of the paper pattern which involves more significant interaction with the user is proposed through interfaces and interconnection mechanisms consisting of fabric directly taken from the module, which the consumer can manually assemble to make the desired garment. This choice stems from the desire to actively engage the user in creating the garment, establishing an emotional bond with the garment to positively influence his or her attachment and thus increase its use and lifespan. A pioneering example is The Post-Couture Collective⁵ (2015), a collection of modular garments made up of parts of paper patterns to be assembled autonomously without the need for sewing machines, but employing fabric

connectors obtained on the module itself: the product is made to the user's request, thus customisable on the user's body measurements, digitally downloadable from the site, made in kits to be assembled then manually, and produced by laser cutting a material similar to neoprene made of PET from recycled bottles (Fig. 7).

Self-Assembly⁶ (2022) designs and produces in a fully automated and digital manner a kit for the construction of garments ready for manual assembly by users employing a unique technique of tying the connectors obtained by laser cutting the fabric of the pattern. Similar, but with playful and educational intent, is the approach of Puzzleware / Convertibles by Almaborealis⁷ (2021), a modular system of coloured wool knitted garments that children can sew by hand by inserting the needle into the holes on the different portions of the knitted patterns (Figg. 8, 9).

Garments derived from modular deconstructed blocks | The separation and recombination of deconstructed modules due to their geometric qualities and the ability to reconfigure into alternative and non-constant functions is another experimental example of modularity. The design approach is multifaceted and can be characterised by a fixed fundamental element that interfaces with other elements ('bus' modularity) or through modular blocks that can be separated and recombined with equal and different functionality ('mix' modularity). Configurability does not require sewing skills but is based on mechanical interfaces such as zips, buttons or connectors that ensure simplified interaction to promote creative experimentation by the consumer; configurability is therefore designed by the designer so that there is more significant creative potential in the recombination of modules by the user. Rahman and Gong (2016) present a transformable prototype exemplifying this approach, consisting of 39 modular components



Fig. 11 | Anrealage AW 2019-2020 collection (credit: Anrealage, 2020).

Fig. 12 | Arid by Julia Koerner (credit: Arid, 2021).

Next page

Fig. 13 | Modular collection (source: Chen and Lapolla, 2021).

Fig. 14 | Freedom AW 2017-18 collection by Yuima Nakazato (credit: Freedom, 2017).

Fig. 15 | Example of modularity through 3D printing (source: Spahiu, Canaj and Shehi, 2020).

that can be configured in different styles according to different functionalities through the metal mechanical interface of hinges, which are considered more practical and secure (Fig. 10). In contrast, the autumn-winter 2020 collection by Anrealage⁸ is described as 'pick 'n' mix hybrids' and is characterised by colourful, modular and assemblable blocks. The creative process first worked on the composition through colour and morphological combinations without considering the body, and, in a second phase, the combinations were superimposed on the human anatomy to generate garments.

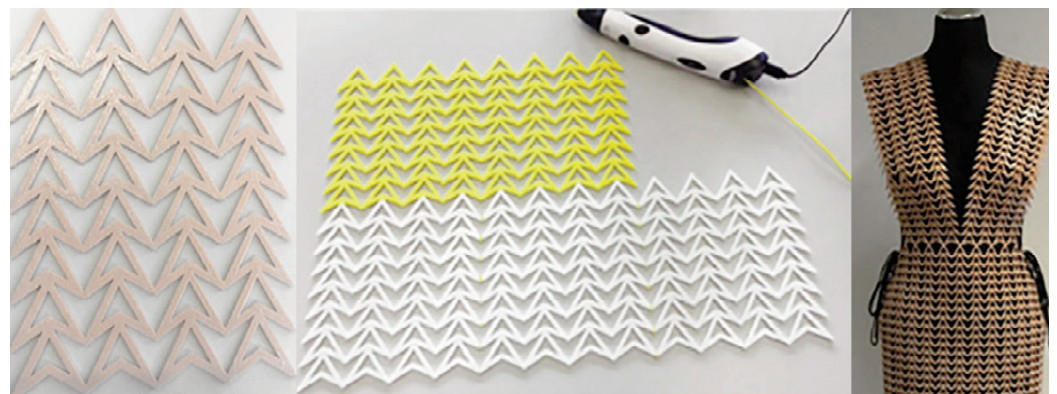
The different configurability of the modules is determined by a metal interface consisting of a system of snap fasteners that allows the modules to be detached and rearranged. At the design level, it is, therefore, necessary to match the length of certain seams on the whole body and on various types of clothing and fabrics to ensure that all pieces can be moved and recombined: a collar can become a cuff, while a bodice can be transformed into the lower part of a skirt (Fig. 11).

Finally, Julia Koerner's modular Arid⁹ collection (2021) consists of 38 modular parts that can be combined to form a complete suit or, thanks to various configurable combinations, jackets and skirts of different lengths. Using the Polyjet 3D printing technology from Stratasy, the resin is deposited on a perforated fabric, allowing lightness, wearability, breathability and comfort. The same technology allows the colours of the garment to vary, creating rich and detailed contemporary aesthetics. The positioning of the modules is based on the arrangement of muscles and the anatomy of a female body. In contrast, the connection interface between the various modules consists of connectors printed directly on the fabric in 3D. In this case, the system is designed to allow for customised garment fitting thanks to a garment engineering process based on 3D scanning of the wearer's body (Fig. 12).

Garments deconstructed into modular geometric micro-units | Geometric modularity (Li, Chen and Wang, 2018) characterises garments based on repeated modular tessellation in which the modular unit is minimal in the form of a triangle, square, or hexagon whose interconnection is achieved employing textile interlocks that are integrated within the modules themselves through cuts and tabs. Based on a sectional modular approach, each modular element uses a standard set of interfaces to connect. The configurability of the modules is designed to create highly flexible planar or three-dimensional textile structures to form multiple garments for wear; in fact, the configurability in a specific garment is not predetermined but derives from the creative manipulation and structuring of the modular geometric micro-units.

The most commonly used materials in this approach are artificial fabrics, such as felt and neoprene, which do not tend to fray after cutting by laser technology and in which the interlocking and interconnecting interface system between the modules is particularly resistant to tensile stress and does not wear out easily as a result of frequent assembly and disassembly.

For this modular typology, an initial approach is provided by the Nomadic Wonderland project (Hur and Thomas, 2011), which uses the triangu-



lar module inscribed in a circle and from which the slots for the interconnection system between the modules are obtained. On the same theme, Chen and Lapolla (2021) developed modular units based on triangles and hexagons with more geometrically complex interfaces that can be realised by laser cutting; the latter allows for more excellent detailing but forces the use of artificial materials to limit post-cutting fraying (Fig. 13).

Further material explorations are carried out in the project Metabolism¹⁰ (2015) by Bolor Amgalan, whose textile materials of the modules were made ad hoc by glueing different layers together to obtain unconventional functional and aesthetic characteristics, combining comfort, aesthetics and structure; however, the modules made are more difficult to manage at the end of the product's life because they are difficult to separate. Fragment Textiles¹¹ (2009) uses a formally dual tessellation, square and star, intersecting based on mathematical and geometric principles, creating multiple formal and dimensional compositions.

Further formal explorations are collected in the Open Source Circular Fashion Catalogue¹² (n.d.), an archive platform of conceptual projects on geometric modularity and circularity that can be realised through additive and subtractive prototyping and manufacturing. About this, the combina-

tion of tasks that can only be done by machines, such as 3D printing, and those that can only be done by human hands, such as assembling the modular components, gives rise to a new type of clothing in Yuima Nakazato's AW 2017-18 Freedom¹³ (2017) collection.

The Japanese designer uses a digital mathematical approach to calculate the modular units required to construct the custom-made garment for each individual. While the single modular units are machine-cut, the three-dimensional garment is manually assembled through a 3D-printed connection system that requires insertion into fabric slots. This approach can produce different models, allowing different materials to coexist in the same garment (Fig. 14).

Finally, the modules can be obtained directly from 3D printing as in the projects of Danit Peleg¹⁴ (2015), Spahiu, Canaj and Shehi (2020) and Tufan Tolmaç and Ismal (2022), who exploit the limited size of the 3D printing plane of FDM technology and join the modules through the 3D printing pen or the heat of the soldering iron / iron, making the modules indivisible once assembled (Fig. 15). In contrast, Chen (2022) proposes a modular system with 3D printing and the shape of a six-petaled flower, whose slots function as a manual assembly and disassembly system.

Concluding remarks for modularity supported by creativity, technology and sustainability |

The result of the conducted analysis presents modular fashion as a strategic research and development tool in academia and small companies, lacking large-scale industrial diffusion. Barriers to the diffusion and scalability of modular fashion are identified in the necessary transformation of design and production processes, garment aesthetics, end-user use and consumption behaviour and companies' business models (Peter, n.d.). At the same time, the research reveals that new Industry 4.0 technologies can enhance production feasibility and interoperability between supply chain actors. In terms of environmental sustainability, modular fashion turns out to be a helpful strategy to make better use of textile resources and to prolong the lifespan of fabric and garment, improving the relationship between garments and users in order to develop an emotional attachment as opposed to the psychological obsolescence from which today's overconsumption derives (Chapman, 2009). Furthermore, by promoting prolonged interaction with the garment during use by replacing critical and worn components, multiple cycles of reuse are activated that enhance the garment's durability and care before, in the extreme case, it is recycled or landfilled (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

The analysed case studies show that disassembly and recyclability at the end-of-life are only possible through a judicious choice of mono-material textiles for individual modules. However, on the one hand, a connection interface between modules consisting of metal accessories (such as buttons and zips) makes the product reconfigurability processes more agile and faster. On the other hand, it creates a more complex management of the disassembly and recycling phase of the garment at the end-of-life, thus invalidating the circularity of the module and the textile. Where otherwise the assembly is manual and is left to the end user through kits to be self-assembled or through garments to be transformed, the modular connection interface system is more sustainable and circular; in these cases, it is necessary to limit the constructive complexity of the garments and guide the user in the assembly through tutorials that make the activity more pleasant for a non-expert, even when it is not necessary to use a sewing machine.

From the point of view of social sustainability, some of the cases analysed bring modularity back to a concept of inclusiveness and customisation of the garment: through the 'cut-to-fit', present in almost all the cases analysed, the modules become dimensionally modifiable elements in order to be adapted to the user's needs, either through the mathematical tessellation of the modules according to the anthropometric measurements of the individual or through a parametric redefinition of the measurements of the modular paper patterns.

Hence, in a dimension of social sustainability, modularity makes it possible to transform the garment concerning changes in one's body, eliminating the stigma linked to changing or not finding one's size or a garment that fits one's body correctly, but also concerning style, wearability, and further aesthetic choices. To implement modular design for mass customisation, however, it must be matched by consumer interest and supported by

a service system based on Industry 4.0 technologies, in particular Artificial Intelligence and Internet of Things, to ensure interoperability between the different actors in the supply chain, feasibility at the production and distribution level and scalability of the customisable modular offering (Bertola and Teunissen, 2018; Dan et alii, 2023).

Designing the modularity of a garment proves to be a system that benefits designers' creativity because it potentially allows for ever-changing shapes and styles that can be more easily updated and modified through diverse and flexible collections that are continuous over the years and seasons. However, the effective development of the modular approach requires a change in design attitude, both in strategic terms and concerning the tools used, as well as a progressive modification of the prototyping and production methods; this change also requires new distribution and sales strategies centred on local systems that facilitate a loyal relationship with the user and support his or her buying and wearing experience.

From a cultural sustainability point of view, this study shows the need for design to also deal with the after-sale design of a modular garment: it is necessary to design user interaction activities with the garment during its useful life through systems and services that ensure continuity and loyalty, but also participatory activities, instructional toolkits (Hur, 2015), activating services linking user and company that have currently only been developed at a conceptual level (Karrell, 2014; Dan et alii, 2023). In the future, there is a need to deploy strategies that can act on changing user behaviour when buying and using garments to educate a new consumer culture.

Although surveys on consumer opinion concerning modular fashion are few, respondents' interest shows appreciation for sustainability strategies such as reparability, customisation and styling, colour and usage transformability (Koo, Dunne and Bye, 2013; Niinimäki and Hassi, 2011); however, there is still a lack of scientific studies quantifying the benefits in terms of positive impact given by modular versus traditional garment production (Maldini and Balkenende, 2017). As survey findings, Rahman and Gong (2016) report comments on the aesthetics, practicality and complexity of managing the transformation of a modular garment; concerns include the modular concept being too new to users and the fear of high costs. Therefore, studies validating users' long-term attachment to a garment and confirming the correlation between modularity and reduced consumption and production volumes are needed to overcome these critical issues.

Another research perspective could be to explore new business models that could support fashion companies' adoption of this design and production approach. It is clear that the lack of development of modular systems in the sector also derives from companies' lack of interest in strategies that reduce consumption and economic return. Traditionally based on a linear system, the fashion industry tends to favour established practices rather than radically innovating the processes that determine the development, production and sale of a garment (Buchel et alii, 2018); however, at a theoretical level, modularity is a strategy that can build end-customer loyalty, generate new economies of scale while reducing waste and over-

production (Kusiak, 1999). The technologies of Industry 4.0 could contribute to this objective by simplifying, toward its feasibility, a modular design and production approach through the use of digital tools for faster and more precise prototyping and by optimising product lifecycle management (Bertola and Teunissen, 2018); at the same time, digital tools can contribute to the development of new businesses based on mass customisation, both taking into account the anthropometric measurements of users and their textile, colour, formal and stylistic choices, while RFID tags can be placed on modules to track the life of the product over time. The analysis of the state of the art confirms that there are no such practices but only study proposals and conceptual projects that focus on exploiting technologies with a view to modularity, interoperability and real-time data exchange to promote modularity design in fashion (Dan et alii, 2023).

Modular garments developed, prototyped and produced employing 3D printing present advantages and disadvantages. 3D-printed modular elements have greater strength and durability but also a worse fit, still need to catch up to the parameters of comfort, breathability and lightness achieved in traditional fabrics (Chen, 2020). Laser cutting is historically the technology that has supported most modular designs based on variable geometries with micro-units that can be assembled by precision cutting from even complex digital designs. However, laser cutting has limitations because the fabrics that are cut raw without the use of seams are artificial fabrics and non-wovens that do not fray after cutting, washing and numerous manipulations. In the case where two fabrics are glued together in order to achieve greater comfort and finishing of the contours resulting from the cut, there is, unfortunately, a critical issue regarding the circularity at the end of the product's life, which becomes unmanageable concerning disassembly and recyclability.

Fashion has an important role in today's society not only for the production of garments and their impact and management at the end of their life but also for the cultural and social dynamics it influences: a garment is not only made up of a weave of threads but influences multiple economic, ethical, cultural and environmental factors. With this in mind, it is necessary to deepen multidisciplinary studies concerning the feasibility and scalability of modularity in the fashion industry by exploring new business models based on the use of Industry 4.0 technologies and a design-led approach focusing on the product, the service but also the interaction of the user with the product during use.

Notes

- 1) For more information on Garratt (2016), see the webpage: sandragarratt.com/modboxmodulars/modboxlinelist.html [Accessed 12 October 2023].
- 2) For more information on Omdanne (2016), see the webpage: solve.studio/omdanne [Accessed 12 October 2023].
- 3) For more information on Edit+ (2020), see the webpage: editplusmall.com/ [Accessed 12 October 2023].
- 4) For more information on Flavia La Rocca (2016), see the webpage: flavialarocca.com/en/content/12-the-story [Accessed 12 October 2023].
- 5) For more information on The Post-Couture Collective (2015), see the webpage: artsandculture.google.com/asset/the-post-couture-collective-the-post-couture-collective/9wFYQHnn-y5Zvw?hl=en [Accessed 9 September 2023].
- 6) For more information on Self-Assembly (2022), see the webpage: self-assembly.fi/ [Accessed 12 October 2023].
- 7) For more information on Almboreal (2021), see the webpage: almboreal.com/ [Accessed 12 October 2023].
- 8) For more information on Anrealage (2020), see the webpage: anrealage.com/collection [Accessed 12 October 2023].
- 9) For more information on Arid (2021), see the webpage: juliakoerner.com/aridcollection [Accessed 12 October 2023].
- 10) For more information on Metabolism (2015), see the webpage: boloramgala.com/metabolism-ss15 [Accessed 12 October 2023].
- 11) For more information on Fragment Textiles (2009), see the webpage: refinity.eu/fragment-textiles.html [Accessed 12 October 2023].
- 12) For more information on the Circular Fashion Catalogue (n.d.), see the webpage: oscircularfashion.com/catalogue/all [Accessed 12 October 2023].
- 13) For more information on Freedom (2017), see the webpage: yuimanakazato.com/collection/couture_aw2017-18.html [Accessed 12 October 2023].
- 14) For more information on Danit Peleg (2015), see the webpage: danitpeleg.teachable.com/ [Accessed 12 October 2023].

References

- Ballie, J. and Woods, M. (2018), "Circular by Design – A model for engaging fashion/textile SMEs with strategies for designed reuse", in Crocker, R., Saint, C., Chen, G. and Tong, Y. (eds), *Unmaking Waste in Production and Consumption – Towards the Circular Economy*, Emerald Publishing Limited, Bingley, pp. 103-121. [Online] Available at: doi.org/10.1108/978-1-78714-619-820181010 [Accessed 12 October 2023].
- Bertola, P. and Teunissen, J. (2018), "Fashion 4.0 – Innovating fashion industry through digital transformation", in *Research Journal of Textile and Apparel*, vol. 22, issue 4, pp. 352-369. [Online] Available at: doi.org/10.1108/rjta-03-2018-0023 [Accessed 12 October 2023].
- Bonvoisin, J., Halstenberg, F., Buchert, T. and Stark, R. (2016), "A systematic literature review on modular product design", in *Journal of Engineering Design*, vol. 27, issue 7, pp. 488-514. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09544828.2016.1166482 [Accessed 12 October 2023].
- Buchel, S., Roorda, C., Schipper, K. and Loorbach, D. (2018), *Drift for transition – The transition to good fashion*. [Online] Available at: drift.eur.nl/wp-content/uploads/2018/11/FINAL_report.pdf [Accessed 12 October 2023].
- Brown, S. and Vacca, F. (2022), "Cultural sustainability in fashion – Reflections on craft and sustainable development models", in *Sustainability | Science, Practice and Policy*, vol. 18, issue 1, pp. 590-600. [Online] Available at: doi.org/10.1080/15487733.2022.2100102 [Accessed 12 October 2023].
- Chapman, J. (2009), "Design for (Emotional) Durability", in *Design Issues*, vol. 25, n. 4, pp. 29-35. [Online] Available at: jstor.org/stable/20627827 [Accessed 12 October 2023].
- Chen, C. (2022), "Modular Illusion", in *International Textile and Apparel Association | Annual Conference Proceedings*, vol. 79, issue 1, pp. 1-5. [Online] Available at: doi.org/10.31274/itaa.16013 [Accessed 12 October 2023].
- Chen, C. (2020), "Vanishing Ice", in *International Textile and Apparel Association | Annual Conference Proceedings*, vol. 77, issue 1, pp. 1-4. [Online] Available at: doi.org/10.31274/itaa.11743 [Accessed 12 October 2023].
- Chen, C. and Lapolla, K. (2021), "The Exploration of Geometric Modular System in Textile and Apparel Design", in *Clothing and Textiles Research Journal*, vol. 39, issue 1, pp. 39-54. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0887302X20937 [Accessed 12 October 2023].
- Cramer, J. (2014), "Wear, repair and remake – The evolution of fashion practice by design", in *Shapeshifting Conference, Auckland University of Technology, 14-16 April 2014*, Textile and Design Lab and Colab at Auckland University of Technology, Auckland (New Zealand), pp. 1-18. [Online] Available at: core.ac.uk/reader/56365031 [Accessed 12 October 2023].
- Dan, M. C., Ciorrea, A. and Mayer, S. (2023), "The re-fashion circular design strategy – Changing the way we design and manufacture clothes", in *Design Studies*, vol. 88, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2023.101205 [Accessed 12 October 2023].
- Ellen MacArthur Foundation (2017), *A new textiles economy – Redesigning fashion's future*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy [Accessed 12 October 2023].
- Ellen MacArthur Foundation (2013), *Towards the Circular Economy – An Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition – Vol. 1*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an [Accessed 12 October 2023].
- Fletcher, K. (2014), *Sustainable Fashion and Textiles – Design Journeys*, Routledge, New York.
- Gustafsson, J. (2017), *Single case studies vs. multiple case studies – A comparative study*, pp. 1-15. [Online] Available at: diva-portal.org/smash/get/diva2:1064378/FULLTEXT01.pdf [Accessed 12 October 2023].
- Gwilt, A. (2014), *A Practical Guide to Sustainable Fashion*, Bloomsbury Publishing Plc, London.
- Hur, E. (2015), "Sustainable Fashion and Textiles through Participatory Design – A case study of modular textile design", in *The Journal of the Korean Society of Knit Design*, vol. 13, issue 3, pp. 100-109. [Online] Available at: researchgate.net/publication/304257277_Sustainable_Fashion_and_Textiles_through_Participatory_Design_A_case_study_of_modular_textile_design [Accessed 12 October 2023].
- Hur, E. S. and Thomas, B. G. (2011), "Transformative Modular Textile Design", in *Bridges Coimbra – Mathematical Connections in Art, Music and Science*, Tarquin Publications, pp. 217-224. [Online] Available at: wiki.textile-academy.org/_media/bootcamp2017paris/bridges2011-217.pdf [Accessed 12 October 2023].
- Karrel, E. (2014), *Planned Continuity – Design of sustainable clothing service concept*, Master Thesis, Aalto University Department of Design. [Online] Available at: research.aalto.fi/en/publications/planned-continuity-design-of-sustainable-clothing-service-concept [Accessed 12 October 2023].
- Kasper, M. and Stroomer, E. (2021), "Moltiplicare le vite dei tessuti – Raccolta e riciclo dei tessuti nell'Africa urbanizzata | Multiplying textile lives – Textile collection and recycling in urban Africa", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 9, pp. 224-231. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/9222021 [Accessed 12 October 2023].
- Koo, H. S. (2012), *Design Functions in Transformable Garments for Sustainability*, Doctoral Thesis, University of Minnesota. [Online] Available at: conservancy.umn.edu/handle/11299/133808 [Accessed 12 October 2023].
- Koo, H. S., Dunne, L. and Bye, E. (2014), "Design functions in transformable garments for sustainability", in *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, vol. 7, issue 1, pp. 10-20. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17543266.2013.845250 [Accessed 12 October 2023].
- Koo, H. S., Dunne, L. and Bye, E. (2013), "Design Functions in Transformable Garments for Sustainability", in *International Textile and Apparel Association | Annual Conference Proceedings*, vol. 70, issue 1, pp. 38-39. [Online] Available at: iastatedigitalpress.com/itaa/article/id/1977/ [Accessed 12 October 2023].
- Kusiak, A. (1999), *Engineering Design – Products, Processes, and Systems*, Academic Press, Cambridge.
- Lee, H., Tufail, M. and Kim, K. (2016), "Difficulties in Transformable Design and its Causes", in Marjanovic, D., Storga, M., Pavkovic, N., Bojetic, N. and Skec S. (eds), *DS 84 | Proceedings of the Design 2016 14th International Design Conference*, pp. 2147-2156. [Online] Available at: design-society.org/publication/39023/DIFFICULTIES+IN+TRANSFORMABLE+DESIGN+AND+ITS+CAUSES [Accessed 12 October 2023].
- Li, M.-M., Chen, Y. and Wang, Y. (2018), "Modular design in fashion industry", in *Journal of Arts & Humanities*, vol. 7, issue 3, pp. 27-32. [Online] Available at: dx.doi.org/10.18533/journal.v7i3.1271 [Accessed 12 October 2023].
- Maldini, I. and Balkenende, A. R. (2017), "Reducing clothing production volumes by design – A critical review of sustainable fashion strategies", in Bakker, C. and Mugge, R. (eds), *Product Lifetimes and The Environment 2017 – Conference Proceedings, Delft University of Technology, 8-10 November 2017*, Delft University of Technology and IOS Press, pp. 233-237. [Online] Available at: doi.org/10.3233/978-1-61499-820-4-233 [Accessed 12 October 2023].
- McLaren, A., Goworek, H., Cooper, T., Oxborrow, L. and Hill, H. (2016), "The effect of consumer attitudes on design for product Longevity – The case of the fashion industry", in Lloyd, P. and Bohemia, E. (eds), *Future Focused Thinking – DRS International Conference 2016, Brighton (UK), June 27-30, 2016*, vol. 10, pp. 3831-3845. [Online] Available at: doi.org/10.21606/drs.2016.456 [Accessed 12 October 2023].
- Meyer, M. H. and Lehnerd, A. P. (1997), *The power of product platform – Building value and cost leadership*, Free Press, New York.
- Nadasbas, S. and Cileroglu, B. (2017), "Innovative approaches on modular apparel design", in *Global Journal of Arts Education*, vol. 7, issue 3, pp. 73-82. [Online] Available at: doi.org/10.18844/gjae.v7i3.2974 [Accessed 12 October 2023].
- Niinimäki, K. and Hassi, L. (2011), "Emerging design strategies in sustainable production and consumption of textiles and clothing", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, issue 16, pp. 1876-1883. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.020 [Accessed 12 October 2023].
- Peter, J. (n.d.), "Transformable Fashion – The Biggest Sustainable Clothing Trend That Never Was", in *Fashion Studies Journal*. [Online] Available at: fashionstudiesjournal.org/longform/2018/9/15/transformable-fashion [Accessed 12 October 2023].
- Rahman, O. and Gong, M. (2016), "Sustainable practices and transformable fashion design – Chinese professional and consumer perspectives", in *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, vol. 9, issue 3, pp. 233-247. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17543266.2016.1167256 [Accessed 12 October 2023].
- Spahiu, T., Canaj, E. and Shehi, E. (2020), "3D printing for clothing production", in *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 15, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1177/1558925020948216 [Accessed 12 October 2023].
- Tseng, M. M. and Wang, C. (2014), "Modular Design", in Laperrière, L. and Reinhart, G. (eds), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 895-897. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_6460 [Accessed 12 October 2023].
- Tufan Tolmaç, N. and İşmal, Ö. E. (2023), "A new era – 3D printing as an aesthetic language and creative tool in fashion and textile design", in *Research Journal of Textile and Apparel*, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print. [Online] Available at: doi.org/10.1108/RJTA-05-2022-0058 [Accessed 12 October 2023].
- Ulrich, K. T., Eppinger, S. D. and Yang, M. C. (1995), *Product design and development*, McGraw Hill, New York.
- Watt, J. (2012), *Fashion – The Ultimate Book of Costume and Style*, Dorling Kindersley.
- Yin, R. K. (2014), *Case Study Research Design and Methods*, Sage, Thousand Oaks (CA).

Printed in December 2023
by FOTOGRAF s.r.l.
viale delle Alpi n. 59 | 90144 Palermo | Italy