

ARTICLE INFO

Received 11 September 2024
Revised 14 October 2024
Accepted 16 October 2024
Published 30 December 2024

COMPUTAZIONE INCORPORATA E SPAZIO-MATERIALITÀ

Esplorare la complessità con la cyber-modellazione

EMBODIED COMPUTATION AND SPATIOMATERIALITY

Exploring complexity through cybermodelling

Aileen Iverson-Radtke, Otto Paans

ABSTRACT

Per migliorare la propria efficacia la progettazione digitale odierna richiede una 'complessità limitata' a causa della natura dei parametri che entrano in gioco nella modellazione, al fine di bilanciare la complessità dell'azione progettuale con quella dello strumento utilizzato. Oltre a parametri relativi a forma e contesto emerge un terzo elemento, la 'spazio-materialità', che riflette la relazione tra gli oggetti e lo spazio nella fase della loro realizzazione poiché i materiali rispondono direttamente ai cambiamenti indotti dal contesto. In tale ottica l'articolo esplora un nuovo approccio all'uso della spazio-materialità tramite un'interfaccia digitale-analogica innovativa chiamata 'cyber-modellazione': collegando i dati ambientali in tempo reale ai modelli digitali la cyber-modellazione crea modelli 'vivi' che reagiscono a condizioni di contorno mutevoli, generando una spazio-materialità digitalizzata. Questi ambienti di progettazione computazionale supportano gli aspetti fenomenologici della forma e dello spazio, integrando le sfere del reale e del virtuale.

To improve its effectiveness, today's digital design requires 'bounded complexity' due to the nature of the parameters involved in modelling, creating a balance between the complexity of the design problem and the tool. In addition to parameters related to form and context, a third element emerges, 'spatiomateriality', reflecting the connection between objects and space in physical making, as materials respond directly to changes induced by the context. This study explores a new way of using spatiomateriality through an innovative digital-analogue interface called 'cybermodelling': by linking real-time environmental data to digital models, cybermodelling creates 'live' models that react to changing conditions, generating digitised spatiomateriality. Such computational design environments support phenomenological aspects of form and space by integrating real and virtual spheres.

KEYWORDS

cyber-modellazione, spazio-materialità, modellizzazione simbiotica, fenomenologia, modelli phygital

cybermodelling, spatiomateriality, symbiotic modelling, phenomenology, physical models

Aileen Iverson-Radtke, Architect and PhD, is a Researcher in Berlin and the Founder of ai-r_architecture (Germany). She has been an Adjunct Lecturer at the New York Institute of Technology and Art Institute of New York City (USA). Currently, she advises PhD students, organises workshops at various venues (including MIT and ACADIA) and is a speaker on the topic of 'cybermodelling' at conferences organised by eCAADe, ACADIA, EAAE/ARCC and IASS. E-mail: aileen@air-architecture.net

Otto Paans, Urbanist, Philosopher and PhD, is an independent Designer (The Netherlands). He has collaborated on numerous landscape architecture and urban planning projects and published various articles and books on philosophy, design theory and creative thinking. E-mail: ocpaans@gmail.com



La progettazione si deve confrontare con la complessità dei problemi che deve affrontare (degrado ambientale, cambiamento climatico, trasformazione sociale, ecc.) e i nuovi strumenti e metodologie che ha a disposizione, poiché esiste una profonda 'asimmetria' tra i due elementi generata dalla rappresentazione architettonica che ha privilegiato 'lo spazio dell'astrazione' alle interazioni con il mondo reale (Paans, Pasel and Ehlen, 2019). Per risolvere tale criticità il contributo propone un approccio progettuale che allinea la complessità del nostro tempo con uno 'spazio-problema' arricchito attraverso ciò che è definibile 'complessità limitata' a partire dalla visione sinottica di due paradigmi del progetto: quello 'basato sulla rappresentazione' e quello 'basato sulla materialità'.

Storicamente la professione dell'architetto si è sviluppata attraverso l'abilità manuale dei maestri artigiani, dando vita a una tradizione poi sostituita 'dal paradigma della rappresentazione' introdotto da Leon Battista Alberti che ha creato un divario tra la materialità dell'oggetto costruito e lo spazio rappresentativo in cui l'oggetto 'esiste' prima della sua realizzazione. Questo approccio, reso possibile da relazioni e regole geometriche 'idealizzate', ha generato nella fase di concezione, ovvero nella fase progettuale, una frattura tra l'oggetto realizzato, il comportamento dei suoi materiali e l'interazione tra contesto e oggetto (Carpo, 2011, 2017).

A differenza delle linee dell'architettura gotica che rappresentano e seguono le forze che agiscono sull'edificio e che in qualche modo dichiarano il comportamento dei materiali, la linea dell'Alberti rappresenta il contorno (Spuybroek, 2011) di una forma geometrica pura. Applicando questa chiave di lettura alla progettazione contemporanea, i materiali rappresentati digitalmente come pura geometria sono trattati come 'inerti', pronti per essere modellati a piacimento e il progetto può essere redatto semplicemente utilizzando contorni e proporzioni ideali. Tuttavia se i materiali sono considerati come dotati di propria 'capacità d'azione' allora le linee diventano vettori, espressioni di distribuzione di forze, e il materiale non è più passivo, ma un 'agente' che concorre alla definizione della forma architettonica. Jane Bennett (2004) ha definito questa capacità intrinseca come 'actancy' o 'potere delle cose', cioè capacità di manifestare schemi di comportamento (semi) autonomo.

Il paradigma funzionalista del progetto, promosso dal CIAM nel XX secolo, ha privilegiato il paradigma della rappresentazione valorizzando la visualizzazione e subordinando le capacità reattive dei materiali. Il disegno architettonico è divenuto una rappresentazione geometrica nello 'spazio dell'astrazione': su un tavolo da disegno o in uno spazio digitale non esistono forze di gravità, azioni del vento, degrado dei materiali, espansione o contrazione e luce. Il paradigma della rappresentazione ha così plasmato il rapporto tra architettura e contesto, riducendolo alla proiezione di un'idea formale su uno sfondo passivo. Greg Lynn (1999), pioniere della digitalizzazione nel design, ha invece sostenuto l'importanza di un ambiente digitale dinamico e ha raccomandato di sviluppare l'intuizione umana nel rapporto con il mezzo digitale, piuttosto che affidarsi eccessivamente all'astrazione.

Alla luce di quanto premesso si sostiene la necessità di un cambio di paradigma da un'idea di controllo del progetto tramite la rappresentazione al concetto 'complessità limitata', utile a risolvere le

sfide complesse della contemporaneità; lavorare efficacemente con la complessità implica il rinunciare al controllo (immaginario) attraverso ecologie di intelligenza non umana. La tesi che si avanza sostiene che:

1) nello spazio digitale gli oggetti non sono in grado di fornire feedback in tempo reale per informare l'esito finale del progetto; le simulazioni offrono feedback, ma solo come previsioni idealizzate o risposte preimpostate; la mancanza di feedback dinamici riduce la pratica progettuale a uno strumento per eseguire esiti noti, piuttosto che elevarla a metodologia per la 'scoperta';

2) la rappresentazione geometrica degli oggetti costituisce uno spazio fenomenologicamente riduttivo poiché restituisce l'oggetto nello spazio come composto da punti e linee (arricchito talvolta da splines e NURBS – Non-Uniform Rational Basis Spline) e in alcuni casi da ulteriori informazioni (nel caso del BIM); all'inizio questa 'riduzione' fenomenologica è stata utile perché ha consentito ai progettisti di controllare la complessità del reale attraverso la rappresentazione e il disegno;

3) dal punto di vista della complessità la citata riduzione fenomenologica determina un divario tra forma e contesto perché priva la prima della possibilità di essere 'reattiva' al secondo; il fatto che l'oggetto non sia 'vivo' (punto 1) lo priva di 'profondità' fenomenologica (punto 2), il che rende meno risolutivo il progetto nell'affrontare la sfida della complessità.

Criticità e stato dell'arte | Oggi il progetto viene elaborato in ambienti digitali, frutto di diversi decenni di evoluzione e di due 'digital turns' (Carpo, 2011), la prima delle quali ha evoluto il concetto di astrazione dell'Alberti, gettando le basi per un progetto digitale basato sul mantenimento della distanza dalle realtà dei vincoli materiali e spaziali: la forma digitale è ancora un'astrazione matematica (linee, splines e NURBS) e i computer sono considerati come un'estensione del pensiero astratto umano (Picon, 2004; Cahtarevic and Proho, 2019).

La seconda svolta digitale (in corso) è caratterizzata dall'influenza dei Big Data, dalla potenza di calcolo e dall'intelligenza artificiale che consentono simulazioni di oggetti e ambienti con un potenziale fino a ieri inimmaginabile. Tuttavia persiste una strana 'immobilità' nelle simulazioni prodotte dai software (ad esempio Ladybug, Envi-met, Open Studio, ecc.) nei quali le geometrie 'idealizzate' si confrontano con condizioni ambientali basate su statistiche e le interazioni dinamiche tra oggetto e spazio vengono visualizzate tramite grafici e ridotte a tabelle. In altre simulazioni (prodotte ad esempio da software come Blender, Karamba, Honeybee, ecc.) le interazioni tra oggetti digitali e spazio sono pre-progettate e 'messe in scena'.

Le simulazioni operano dal duplice punto di vista delle rappresentazioni accurate di geometrie complesse (forma) e delle simulazioni ambientali (spazio), tralasciando un aspetto critico dell'architettura che si manifesta nel mondo reale, ovvero la relazione 'vibrante' tra gli oggetti e il loro contesto che produce imprevedibilità, processi organici, capacità di azione indipendente e interazioni fenomenologiche. Le simulazioni realizzate nella pratica corrente non tengono conto dell'interazione tra l'oggetto digitale e il contesto, sottovalutando che gli oggetti sono 'agenti' liberi dinamici, che interagiscono di propria iniziativa e sono in grado di produrre risultati imprevedibili. Trattando la pratica progettuale come astrazione geo-

metrica ci si allontana da aspetti sensoriali e dalle reali caratteristiche e limitazioni dei materiali e del contesto spaziale, svilendo il progetto a un atto gestito da periferiche come mouse e tastiera o da comandi selezionati dal menù o scritti con codici.

Metodo: design computazionale orientato dai materiali e complessità limitata

Per superare le criticità esposte si propone un nuovo cambio di paradigma che segue il suggerimento di Lynn: una terza svolta digitale fondata su un design computazionale basato sui materiali. Un tale approccio affronta l'asimmetria citata in premessa tra complessità estreme delle sfide contemporanee e strumenti tecnologici a disposizione del progetto, prendendo in esame il rapporto dinamico tra forma e spazio e creando sinergie tra intelligenza incarnata (umana e materiale) e strumenti di design computazionale.

Le tecnologie e gli ambienti computazionali oggi disponibili, ricchi di informazioni su contesto e materiali, consentono di supportare un cambiamento nell'evoluzione digitale verso un design computazionale basato sui materiali (Jahn, Morgan and Roudavski, 2014). A tal proposito il filosofo francese Gilbert Simondon (2017) sostiene che gli ambienti generati dall'uomo – plasmati dal pensiero umano – sono profondamente influenzati dalle esperienze vissute (Hanna and Paans, 2021; Paans, 2022), di conseguenza creiamo tecnologia simile a ciò che sperimentiamo e comprendiamo, cioè, ambienti computazionali 'spazio-materiali'. Per supportare la tesi esposta, da un punto di vista metodologico, si prende in esame la modellazione architettonica, nella quale 'i problemi' vengono sistematicamente costruiti come oggetti (analogici e digitali), che si sviluppa attraverso un approccio basato sui due pilastri della complessità limitata e della cyber-modellazione.

Per trovare il giusto equilibrio tra la complessità del problema e le potenzialità degli strumenti a disposizione, si introduce il concetto fondamentale di 'complessità limitata', ispirato alla nozione di 'complessità adattativa' di J. H. Holland (1992): lavorare con un grado sufficiente di complessità scomponendo insieme complessi in parti adattabili (e in evoluzione) consente di trasmettere parzialmente le 'lezioni apprese' in un nuovo ciclo di sperimentazione. In tal modo la modellazione architettonica procede creando oggetti con parametri legati a dimensione e materialità per creare un framework di complessità limitata che trovi soluzioni per il progetto. È importante trovare il giusto equilibrio tra fattori da considerare e strumenti a disposizione poiché considerare un elevato numero di elementi porta a una 'complessità sfrenata', mentre considerarne pochi riduce il progetto a una rappresentazione semplicistica.

La 'complessità limitata' è un microcosmo contenente elementi chiave rilevanti per un problema complesso e mira ad attivare relazioni spazio-materiali dinamiche all'interno di uno spazio-problema 'rarefatto', consentendo agli oggetti di essere 'vivi' e di connettersi a ecologie di intelligenza esterna che possono essere coinvolte nel processo di generazione delle soluzioni.

Cyber-modellazione | Per esplorare la capacità della 'complessità limitata' di risolvere problemi si prevede di utilizzare la modellazione ibrida analogico-digitale, chiamata 'cyber-modellazione', il cui termine 'cyber' è descritto da Mario Carpo (2023) come una qualsiasi mediazione tra il mondo digitale e quello fisico che utilizza l'elettronica. La cyber-modella-

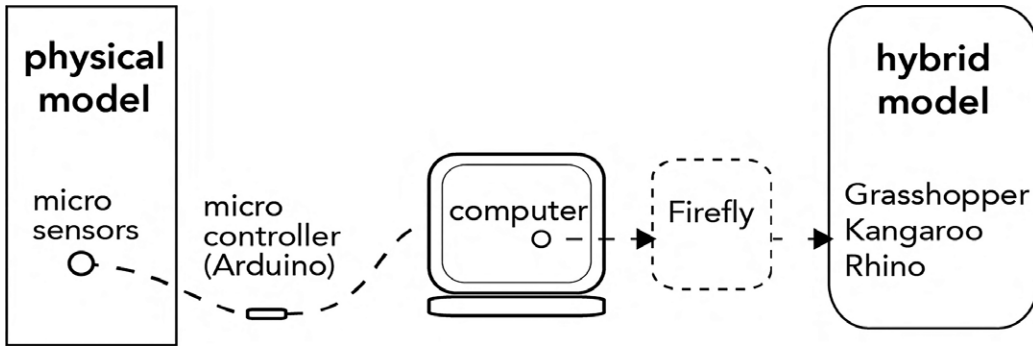


Fig. 1 | Diagram of the analogue smart model as an interface to computational model (credit: A. Iverson-Radtke, 2022).

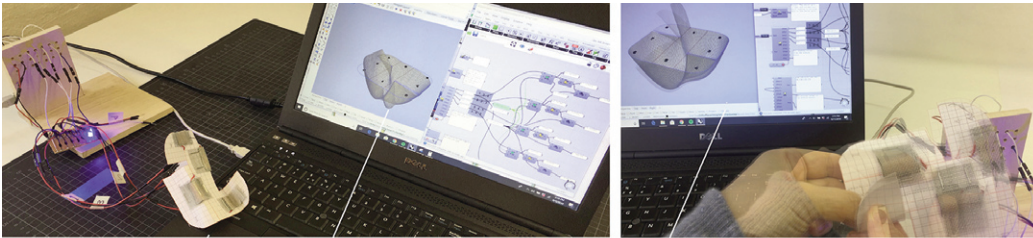


Fig. 2 | Bending Plane: analogue model with DIY pressure sensors as interface to parametric model (credit: A. Iverson-Radtke, 2022).

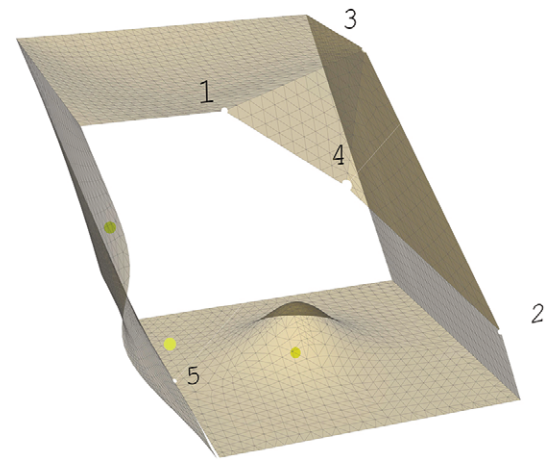
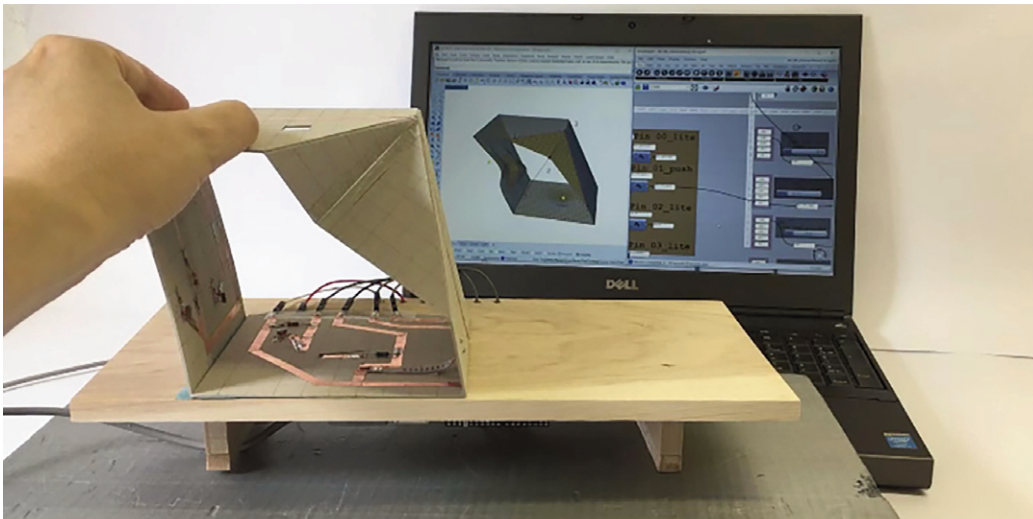
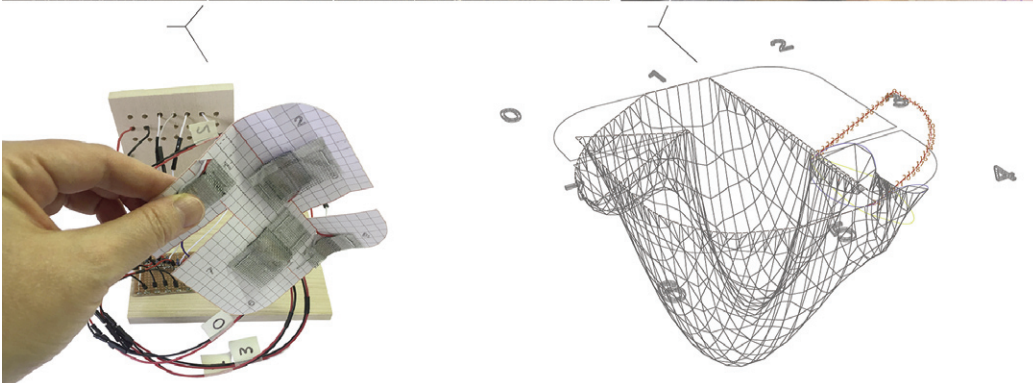


Fig. 3 | Deforming Rhomboid: analogue model integrating light and flex sensors as interface to parametric model (credit: A. Iverson-Radtke, 2022).

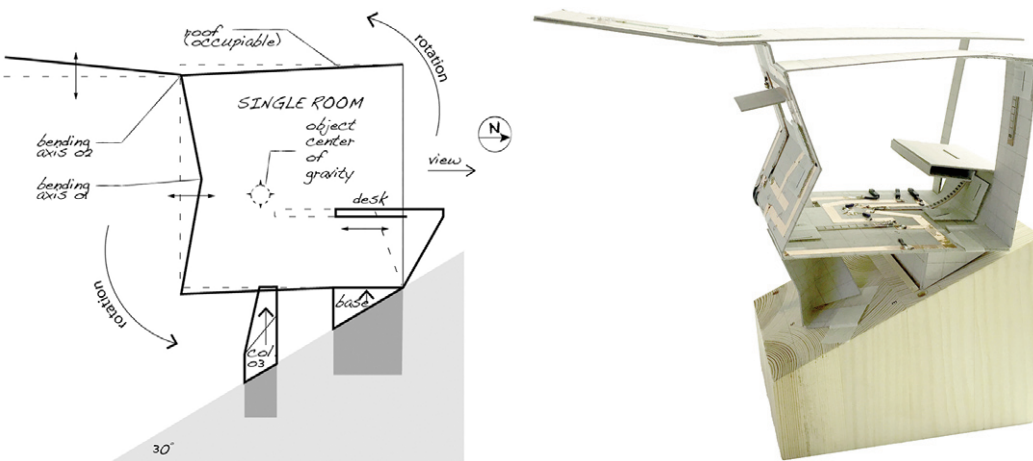


Fig. 4 | Room on a Slope: diagram and analogue model (credit: A. Iverson-Radtke, 2022).

Next page

Fig. 5 | Room on a Slope: analogue and parametric model (credit: A. Iverson-Radtke, 2022).

zione in quanto Interfaccia Uomo-Computer (Human-Computer Interface – HCI) e modellazione ibrida analogico-digitale è facilitata dall'elettronica microsensoriale, che impiega modalità analogico-digitali e combina metodi di modellazione tradizionali e computazionali.

La letteratura scientifica sull'Antropocene considera gli esseri umani come uno dei molti agenti interconnessi all'interno dell'ecosfera (Bennet, 2004; Morton, 2013; Harman, 2018), pertanto la modellazione architettonica – che opera in tempo reale e con finalità esperienziali – diventa un campo dinamico di coinvolgimento con tutti gli attori, ancorché ontologicamente diversi (Colombino and Childs, 2022).

La cyber-modellazione impiega microsensori e circuiti elettronici integrati nei modelli architettonici analogici e i cyber-modelli sono collegati a microcontrollori che traducono dati fisici (determinati da manipolazioni manuali e condizioni ambientali) in uno script parametrico (Fig. 1). Si creano così modelli digitali 'vivi' come oggetti-problema 'incarnati' o 'spazializzati' che assumono cioè una propria attitudine a interagire nello spazio con forze dinamiche ed effetti fenomenologici. Questa loro capacità indipendente, o 'potere delle cose', cede parte del controllo sui risultati del problema all'autonomia dell'intelligenza materiale, rispondendo autonomamente al contesto in base alle proprietà chimico-fisiche dell'oggetto. Sfruttando il Brute Force Computing i modelli computazionali generativi attingono alle stesse ecologie di intelligenza materiale e ambientale coinvolte nella creazione di complessi problemi 'wicked' per contribuire alla loro risoluzione.

In quanto rappresentazioni scalate i modelli fisici riportano sia l'oggetto di design (forma) sia gli elementi del contesto (spazio) all'interno di una formulazione integrale basata sull'oggetto. La trasformazione in oggetti rende più accessibili alla nostra cognizione sensoriale e intellettuale i problemi, amplificandone così la capacità di considerare il problema in modo integrale. A tale scopo la cyber-modellazione HCI implementa il design computazionale con un'interfaccia di modellazione fisica, ottimizzando la nostra capacità innata di comprendere le 'relazioni materia-forma': unendo la familiarità tattile dei materiali fisici con la rapidità di esecuzione degli strumenti digitali, i sistemi ibridi (spazio-materiali e analogico-digitali) sono in grado di generare oggetti 'vivi' che rispondono attraverso feedback, comunicazione e istruzioni non verbali (Gandia et alii, 2023).

A seguire si presentano alcune sperimentazioni di cyber-modellazione di cui si esplicitano i risultati qualitativi in ambiente ibrido. I primi tre casi stu-

dio rivelano le prime intuizioni di chi scrive sulla natura della 'materialità computazionale' e le differenze rispetto alla materialità fisica; gli esiti, combinati con l'esperienza di cyber-modellazione, costituiscono un punto di partenza per lo sviluppo della cyber-modellazione nei workshop in corso che, sempre più, confermano una scoperta chiave emersa nelle prime sperimentazioni: il concetto di 'spazio-materialità' (Iverson-Radtke, 2022).

Caso 1: proprietà non omogenee | La prima sperimentazione di modellazione ibrida analogo-digitale è stata la piegatura di un piano rettangolare (Fig. 2) con angoli arrotondati, ritagliato in modo che le sue parti potessero essere piegate in modo indipendente, sul quale sono stati applicati dei microsensori per monitorare il movimento. L'integrazione dei microsensori al materiale analogico (il piano) ha creato un oggetto 'intelligente' (modello) che è stato collegato a un microprocessore per tradurre i dati (in questo caso, il movimento provocato dall'azione di piegatura) in un modello digitale.

Alla piegatura del modello analogico avrebbe dovuto corrispondere quella del modello digitale: in realtà mentre il componente analogico si piegava in modo uniforme, il suo omologo digitale mostrava un comportamento diverso e non uniforme. La spiegazione della mancata rispondenza alla piegatura è nelle proprietà del materiale, che sono 'matematiche' (chimico-fisiche) e consistono in definizioni geometriche e relazioni diverse, determinate ad esempio da perimetro, area e baricentro. Per ottenere nel modello digitale la stessa piegatura del componente analogico, il materiale computazionale deve essere programmato per simulare il comportamento di un materiale fisico. La sperimentazione ha messo in evidenza la netta differenza tra le proprietà fisiche omogenee dei materiali e le differenti proprietà dei materiali computazionali.

Caso 2: causalità programmata | La seconda sperimentazione ha integrato alcuni sensori ambientali (di luce) in un volume romboidale aperto per valutare come l'intensità della luce naturale può guidare la modellazione computazionale nel deformarne i piani (Fig. 3). La sperimentazione ha rivelato che il sensore non detta necessariamente o corrisponde direttamente a specifiche articolazioni della modellazione, tuttavia è possibile programmare una relazione tra i dati del sensore e l'articolazione della modellazione. In questo caso i valori di luminosità rilevati dei sensori non sono stati utilizzati per progettare elementi architettonici normalmente associati

alla luce naturale, determinando la dimensione o la posizione delle finestre (le bucatore dei uno dei piani).

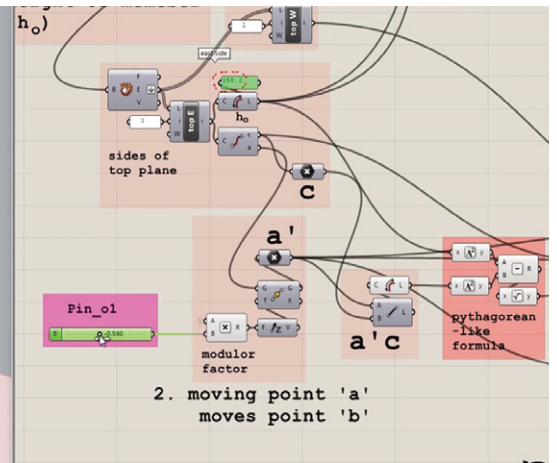
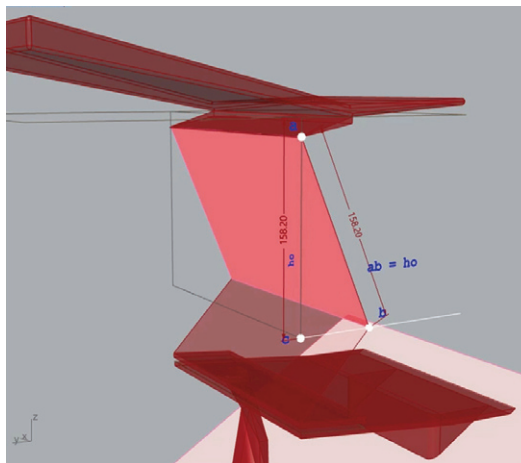
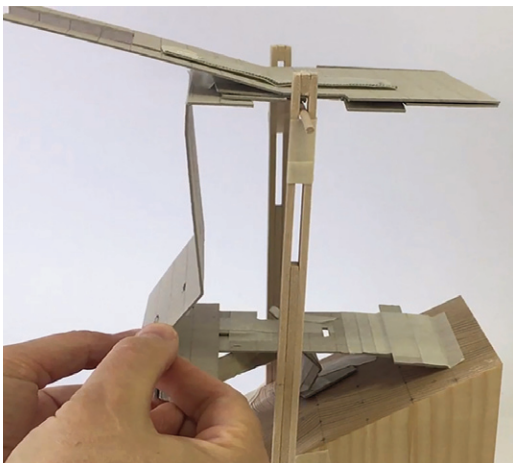
A differenza dei materiali fisici, nella cyber-modellazione i progettisti possono intervenire, simulare e programmare l'impatto causa-effetto dei fattori ambientali; in altre parole il 'comportamento naturale' di fenomeni come la luce naturale non deve essere accettato passivamente, ma può essere utilizzato per attivare azioni determinate da cause diverse.

Caso 3: allineamento spaziale | La terza sperimentazione ha interessato il progetto di una singola stanza posizionata su un piano inclinato (Fig. 4). Lo scopo della modellazione è individuare la soluzione più adeguata alle condizioni del contesto, poiché l'inclinazione del piano di sedime determina uno scivolamento della stanza a causa della forza di gravità. L'esperimento ha confermato le differenze di comportamento tra i materiali reali e quelli computazionali, la cui tendenza è allungarsi all'infinito.

Ad esempio quando si piega il prospetto sud della stanza, per evitare il comportamento predefinito di allungamento all'infinito delle superfici computazionali e mantenere la lunghezza originale del muro durante la piegatura della superficie, è stato necessario programmare le superfici digitali affinché alla loro piegatura corrispondesse una riduzione dell'altezza della stanza, come avviene nel caso dei materiali analogici (Fig. 5). La sperimentazione conferma che i materiali digitali non hanno limiti dimensionali intrinseci e richiedono una programmazione specifica dei limiti dimensionali reali e dei comportamenti associati.

Workshop: il problema del progetto del 'vaso di gomma' | I workshop di cyber-modellazione sviluppano il tema del progetto 'vaso di gomma', in cui una striscia di gomma contenente due sensori flessibili, inclinati verso il basso funge da componente analogo collegato elettronicamente a un B-Spline parametrico, rappresentante una sezione del vaso. Mentre i partecipanti modellano manualmente la striscia di gomma in tempo reale si modifica la sezione del vaso, imparando che la progettazione architettonica è una soluzione formale che dipende dall'intento progettuale (modellazione manuale), ma è soprattutto frutto di valutazioni sul sito (inclinazione) e sui materiali (flessibilità), come illustrato nella Figura 6.

I laboratori introducono una complessità unica: oggetti di design 'vivi' animati attraverso la spaziotemporalità computazionale, in cui i materiali digitali interagiscono continuamente con le proprietà spa-



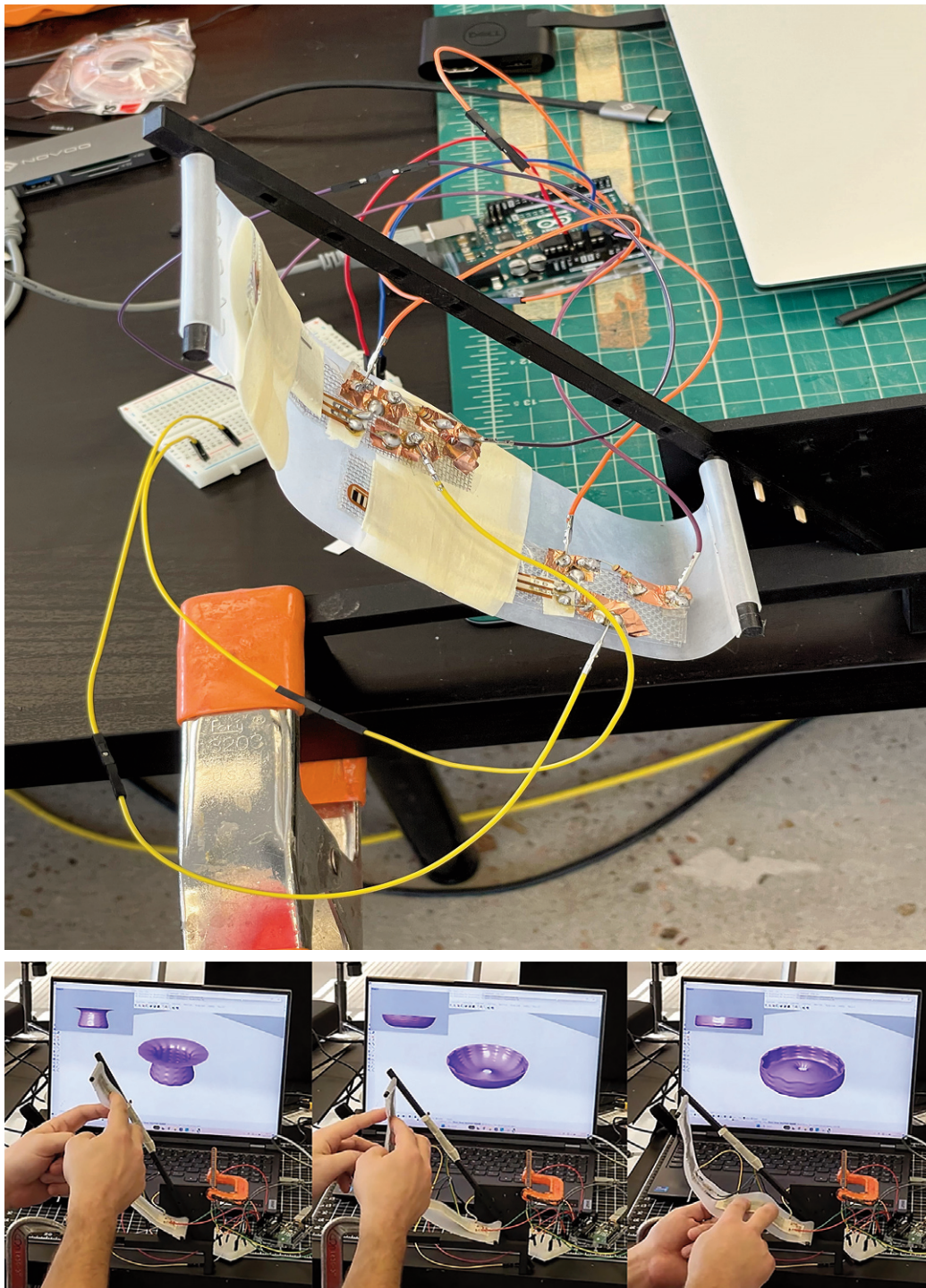


Fig. 6 | Rubber Vase Cybermodel: analogue model integrating flex sensors and interface to digital vase (credit: A. Iverson-Radtke and A. Gandia, 2023).

ziali tramite micro-sensori. I partecipanti apprendono così in modo euristico che il progetto si basa su materiali attivi e reattivi in un ambiente dinamico e, una volta acquisita familiarità con la cybermodellazione, esplorano le variazioni determinate dai dati dei sensori ambientali – relativi a suono, luce o vento – per articolare ulteriormente il vaso (Fig. 7). In tale ottica i vasi del workshop sono modellati manualmente e parametricamente, risultanti dall'interazione tra contesto (fattori spaziali) e forma (proprietà materiali), come illustrato nella Figura 8.

I risultati delle sperimentazioni ci invitano a riflettere sull'attuale prassi del progetto digitale, rivalutandone gli esiti così lontani dall'esperienza del mondo reale, e fanno emergere due punti chiave:

- 1) allineare i comportamenti degli oggetti digitali a quelli fisici migliora la nostra capacità di 'conoscere' gli oggetti che progettiamo digitalmente;
- 2) considerare la materialità nel progetto computazionale fornisce la base per una svolta digitale basata sui materiali. Per una diffusione della modellazione cibernetica con approccio ibrido analogico-digitale occorre tuttavia superare i limiti emersi dalle sperimentazioni e individuati nella necessità di evolvere le tecnologie attuali e bisogna altresì acquisire competenze tecniche specialistiche legate alla costruzione di modelli fisici e computazionali (Fig. 9) e alla realizzazione di circuiti elettronici (Fig. 10), con cui il progettista deve necessariamente confrontarsi monitorando costantemente la qualità dei risultati (Pye, 1968).

Riflessioni conclusive | In quanto entità spazio-materiali gli oggetti computazionali e fisici non dovrebbero essere trattati come fossero presenti nel vuoto o in uno spazio ideale poiché l'ambiente digitale oggi consente di studiare e progettare considerando l'influenza del contesto sulle caratteristiche fisico-chimiche della materia. Tuttavia ciò è possibile farlo solo plasmando l'oggetto all'interno di una 'complessità limitata' che prevede la selezione di alcuni elementi chiave considerati rilevanti rispetto alla complessità del problema da risolvere: si attiva così un processo progettuale che agisce sulla forma di 'oggetti viventi' in quanto interagenti con fenomeni circostanti.

In tal senso il contributo Rinnova la prassi progettuale invitando a inquadrare i problemi come complessità limitate, per creare condizioni spaziali e dinamiche più facilmente valutabili su cui intervenire attraverso comandi non verbali per mezzo di ecologie non umane. Poiché i materiali possiedono un'attitudine che si estende ben oltre l'utilizzo degli oggetti come componenti passivi è opportuno aprirsi 'verso le cose stesse' (Jacquet and Giraud, 2012), mettendo in pratica nel progetto concetti già sviluppati in ambito filosofico (Delanda, 2015; Menges, 2007) e che mettono in risalto le possibilità, i limiti e le caratteristiche dei materiali: la capacità autonoma del modello di 'formarsi' può aprire così a un nuovo campo teorico fondato sulla capacità di azione dei materiali (Wolfram, 2002; Ingold, 2007).

Un'altra considerazione è legata alla tipologia di ricerca e porta a riflettere sull'eccessiva enfasi della replicabilità nel progetto architettonico. Le attività del workshop sul 'vaso di gomma', che mirano a stimolare capacità e attitudini attraverso la pratica, evidenziano come la replicabilità sia superata dall'acquisizione della tecnica e dalla padronanza del suo utilizzo: non è da aspettarsi, ma è auspicabile, che la ricerca porti a risultati diversi.

L'ambito computazionale che prende in esame la spazio-materialità richiede al progetto architettonico di rinunciare al controllo o all'assunzione di una previsione perfetta; questo approccio è positivo, data la nostra limitata capacità cognitiva e la crescente complessità dei problemi odierni. Le potenzialità dei cyber-modelli di operare con una 'intelligenza altra' dalla nostra porterà probabilmente a trovare soluzioni più efficaci di quelle che siamo in grado di elaborare con le nostre limitate capacità, aiutandoci a plasmare il futuro di un ambiente costruito in collaborazione con i sistemi ambientali.

Design, confronted with the complexity of the problems it faces (environmental degradation, climate change, social transformation, etc.) and the new tools and methodologies at its disposal, operates in a profound 'asymmetry' stemming from the fact that architectural representation has privileged 'the space of abstraction' over interactions with the real world (Paans, Pasel and Ehlen, 2019). To resolve this critical issue, the study proposes a design approach that aligns the complexity of our time with a 'problem-space' enriched through what can be defined as 'bounded complexity' from the synoptic view of two different design paradigms: the 'representation-based' and the 'materiality-based'.

Historically, the architectural profession developed through skilled manual labour among master craftsmen, giving rise to a tradition later superseded by the 'representation-based paradigm' introduced

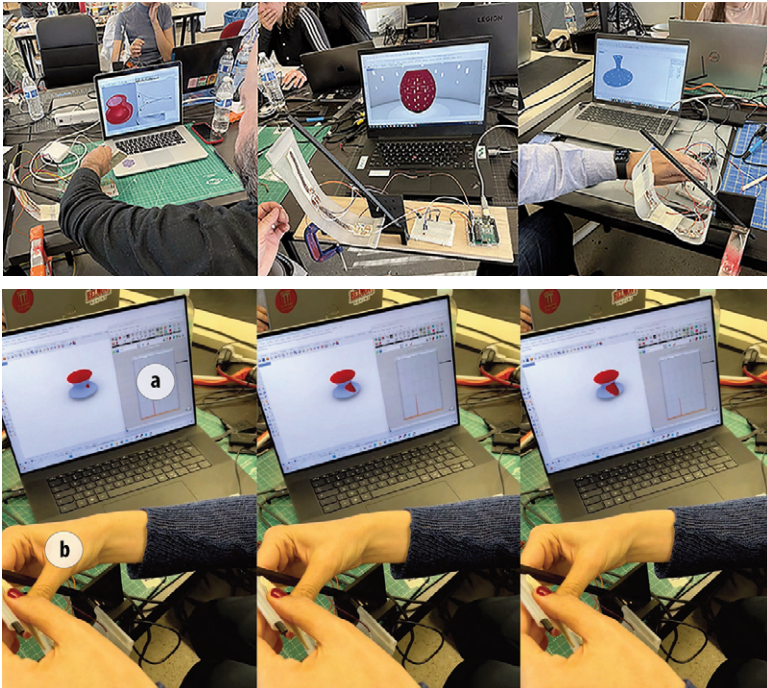


Fig. 7, 8 | Cybermodeling the Rubber Vase variations: responding to sound and manual shaping (credits: A. Iverson-Radtke and A. Gandia, 2023).

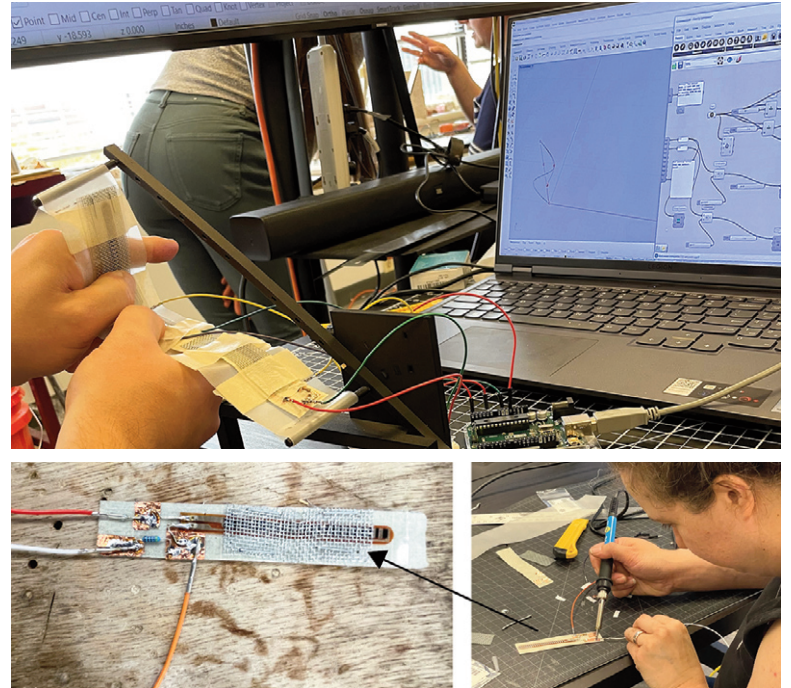


Fig. 9, 10 | Cybermodeling the Rubber Vase: testing the interface; building sensors into analogue model (credits: A. Iverson-Radtke and A. Gandia, 2023).

by Leon Battista Alberti, which created a gap between the materiality of the built object and the representational space in which the object 'exists' before its realisation. This approach, made possible by 'idealised' geometric relationships and rules, generated in the conception phase, i.e. the design phase, created a gap between the realised object, the behaviour of its materials and the interaction between context and object (Carpo, 2011, 2017).

Unlike the lines of Gothic architecture, which represent and follow the forces acting on the building and, in some way, determine the behaviour of materials, Alberti's line represents an outline (Spuybroek, 2011) of a pure geometric form. Applying this lesson to contemporary design, materials digitally represented as pure geometry are treated as 'inert', ready to be shaped at will, and the design can be drafted simply using outlines and ideal proportions. However, if materials are understood as having their own 'capacity for action' then lines become vectors, expressions of force distribution, and the material is no longer passive substance, but an active 'agent' in the definition of architectural form. Bennett (2004) defined this inherent capacity as 'actancy' or 'thing-power', the ability to display (semi)-autonomous behaviour patterns.

The functionalist design paradigm, promoted by CIAM (amongst others) in the 20th century, favoured the representational paradigm, emphasising visualisation and subordinating active material capacities. Architectural drawing became a geometric representation in the 'space of abstraction': on a drawing board or in a digital space, there is no gravity, wind, material degradation, expansion or contraction, or light. The representational paradigm has thus shaped the relationship between architecture and context, reducing it to the projection of a formal idea onto a passive background. In contrast, Greg Lynn (1999), a pioneer of digitisation in design, advocated the importance of a dynamic digital environment and recommended developing human intuition in dealing with the digital medium, rather than relying too much on geometrical or representa-

tional abstraction. In light of the above, we argue that there is a need for a paradigm shift from an idea of design control through representation to the concept of 'bounded complexity', which is useful in solving complex contemporary challenges; working effectively with complexity implies relinquishing (imaginary) control through ecologies of non-human intelligence. The thesis put forward argues that:

- 1) within digital space, design objects are unable to provide real-time feedback to inform final design outcomes; simulations offer feedback, but only as idealised predictions or pre-set reactions; the lack of dynamic feedback reduces design practice to a tool for executing known outcomes, rather than elevating it to a methodology for discovery;
- 2) the geometric representation of architectural objects constitutes a phenomenologically reductive space as it renders the object in space as composed of points and lines (sometimes enriched by splines and NURBS) and in some cases by additional information (in the case of BIM); initially, this phenomenological 'shallowness' is a positive feature because it enables designers to reduce the complexity of the world to a visual representation;
- 3) from the view point of complexity, this phenomenological reduction leads to a gap between form and context as it deprives the former of the possibility of being 'responsive' to the latter; the fact that the object is not 'live' (point 1) deprives it of phenomenological 'depth' (point 2), resulting in architectural practice at odds with the demands of complexity.

Critical issues and state-of-the-art | Today, design is elaborated in digital environments, the result of critical evolution commonly referred to as two 'digital turns' (Carpo, 2011), the first of which further developed Alberti's concept of abstraction, laying the foundations for a digital design based on maintaining distance from the realities of material and spatial constraints: digital form is still a mathematical abstraction (lines, splines and NURBS) and computers are considered as an extension of human abstract

thought (Picon, 2004; Cahtarevic and Proho, 2019). The second digital turn (currently in progress) is characterised by the influence of Big Data, computing power and artificial intelligence that enable simulations of objects and environments with previously unimaginable potential. However, an eerie 'stillness' persists in the simulations produced by software (e.g. Ladybug, Envi-met, Open Studio, etc.) in which 'idealised' geometries are compared with statistically based environmental conditions and dynamic object-space interactions are graphically visualised and tabulated. In other simulations (e.g. produced by software such as Blender, Karamba, Honeybee, etc.), digital object-space interactions are pre-designed and 'performed'.

Simulations operate from the dual perspective of accurate representations of complex geometries (form) and environmental simulations (space), leaving out a critical aspect of architecture that manifests itself in the real world, namely the 'vibrant' relationship between objects and their spatial context that produces unpredictability, organic processes, independent agency, and phenomenological interactions. Thus, simulations carried out in current practice do not take the interaction between the digital object and the context into account, underestimating that objects possess dynamic free 'agent', interacting of their own volition and capable of producing unanticipated results. By reducing design practice largely to geometric abstraction, it becomes distanced from sensory and haptic access and the realities of material limitations and spatial context, devolving into an indirect engagement through proxies like mouse and keyboard, using menu selections, or scripted code.

Method: materials-oriented computational design and bounded complexity | To overcome the critical issues outlined above, we propose a new paradigm shift is proposed following Lynn's suggestion: a third digital turn based on materials-based computational design. Such an approach address-

es the asymmetry mentioned in the introduction between the extreme complexity of contemporary challenges and the technological tools available to design, examining the dynamic relationship between form and space and creating synergies between embodied intelligence and computational design tools.

Today's available technologies and computational environments, rich in spatial and material information, support the shift in digital evolution toward material-based computational design (Jahn, Morgan and Roudavski, 2014). In this regard, the French philosopher Gilbert Simondon (2017) argues that human-generated environments – shaped by human thought – are deeply influenced by lived experiences (Hanna and Paans, 2021; Paans, 2022), consequently, we create technology similar to what we experience, inhabit and understand, i.e., 'spatial-material' computational environments. To support this thesis, from a methodological point of view, we examine architectural modelling, in which 'problems' are systematically constructed as objects (analogue and digital), developed through an approach based on the two pillars of bounded complexity and cybermodelling.

To strike the right balance between the complexity of the problem and the potential of the available tools, the fundamental concept of 'bounded complexity' is introduced, inspired by the notion of 'adaptive complexity' by J. H. Holland (1992): working with a sufficient degree of complexity by breaking down complex ensembles into adaptable (and evolving) parts allows the 'lessons learned' to be partially transmitted in a new round of experimentation. In this way, architectural modelling proceeds by creating objects with parameters related to size and materiality to create a framework of bounded complexity to find solutions for the project. It is important to strike the right balance between the factors to be considered and the tools available since considering too great a number of elements leads to 'rampant complexity' while considering only a few reduces design to simplistic visual representation.

Bounded complexity is a microcosm containing key elements relevant to a complex problem and aims to activate dynamic spatiomaterial relationships within a 'rarefied' problem space, enabling live design objects to connect to external intelligence ecologies that can be enlisted in the process of solution generation.

Cybermodelling | Hybrid analogue-digital modelling, called 'cybermodelling', is envisioned to explore the ability of finite complexity to solve problems, the term 'cyber' being described by Mario Carpo (2023) as any mediation between the digital and physical worlds using electronics. Cybermodelling as Human-Computer Interface (HCI) and hybrid analogue-digital modelling is facilitated by microsensor electronics, thus leveraging analogue-digital modalities and combining traditional and computational modelling methods. Contemporary literature examining the Anthropocene considers humans as one of the many interconnected agents within the ecosphere (Bennet, 2004; Morton, 2013; Harman, 2018), therefore architectural modelling – operating in real-time and fully experiential – becomes a dynamic field of engagement with all actors, albeit ontologically different (Colombino and Chids, 2022).

Cybermodelling integrates microsensors and electronic circuits embedded in analogue architectural models, and these cybermodels are wired to

microcontrollers, which translate physical data (determined by manual manipulations and environmental conditions) into a parametric script (Fig. 1). Thus, 'live' digital models are created as 'embodied' or 'spatialised' problem-objects, i.e. assuming their own agency of interacting in space with dynamic forces and phenomenological effects. This independent capacity, or 'thing-power', cedes some control of problem outcomes to the autonomy of material intelligence, autonomously responding to its context based on the chemical and physical properties of the object. Leveraging Brute Force Computing, generative computational models draw on the same material and environmental intelligence ecologies involved in creating complex, 'wicked' problems, to contribute to their resolution.

As scaled representations, physical models encapsulate both the design object (form) and elements of the site (space) within one integral, object-based formulation. Transformation into objects makes problems accessible to our sensible and intellectual modes of cognition, thereby expanding our ability to consider the problem integrally. For this reason, the cybermodelling HCI conducts computational design through a physical modelling interface, optimising our innate ability to understand 'matter-form relationships'. By blending tactile familiarity of physical materials with the rapid iteration of digital tools, hybrid systems (spatial-material and analogue-digital) are able to generate 'live' objects that respond through feedback, communication and non-verbal instructions (Gandia et alii, 2023).

The following paragraphs discuss experiments in cybermodelling, expounding on qualitative findings from this hybrid environment. The first three case studies reveal the nuanced insights into the nature of 'computational materiality' and its differences from physical materiality; the findings, combined with the cybermodelling experience, establish a foundational basis for the development of cybermodelling in ongoing workshops that, increasingly, confirm a key discovery emerging from this research: the concept of 'spatiomateriality' (Iverson-Radtke, 2022).

Case 1: non-homogeneous properties | The first experiment in hybrid analogue-digital modelling was the bending of a rectangular plane (Fig. 2) with rounded corners, cut so that its parts could be folded independently, on which microsensors were attached to monitor its movement. The integration of the microsensors with the analogue material (the plane) created an 'intelligent' object (model) that was connected to a microprocessor to translate the data (in this case, the movement caused by the bending action) into a digital model.

The bending of the analogue model should have been matched by that of the digital model: in reality, while the analogue component bent uniformly, its digital counterpart showed a different, non-uniform behaviour. The explanation for the non-conformity to bending lies in the material properties, which are mathematically represented and consist of different geometric definitions and relationships, determined, for example, by perimeter, area and centre of gravity. To achieve uniform bending in the digital model as in the analogue component, the computational material must be programmed to simulate the behaviour of a physical material. Experimentation highlighted the clear difference between the homogeneous physical properties of materials and the different properties of computational materials.

Case 2: cultivated causality | The second experiment integrated environmental (light) sensors into an open rhomboid volume to assess how the intensity of natural light can guide computational modelling in deforming its planes (Fig. 3). Experimentation revealed that the sensor type must not necessarily dictate or directly correspond to specific modelling articulations. Instead, a relationship between the sensor data and the modelling articulation can be programmed. In this case, rather than design architectural elements normally associated with natural light such as determining the size or position of windows, the brightness values measured by the sensors were used to deform model surfaces.

Unlike physical materials, in cybermodelling, designers can intervene, simulate and programme the cause-effect impact of environmental factors; in other words, the 'natural behaviour' of phenomena such as natural light does not have to be accepted passively, but can be used to trigger actions determined by different causes.

Case 3: spatial alignment | The third experiment involved the design of a single room positioned on an inclined plane (Fig. 4). The purpose of the modelling was to identify the most appropriate solution for the contextual conditions, since the inclination of the ground plane causes significant imbalance of the room due to the force of gravity. The experiment reinforced the inconsistency between the behaviour of real and computational materials, whose default tendency is to stretch infinitely. For example, when bending the south plane of the room, to avoid default behaviour in which surfaces can stretch infinitely, and to maintain the original room height during surface bending, digital surfaces had to be scripted so that bending them results in reduced surface height as would happen in the case of analogue materials (Fig. 5). This finding demonstrates that digital materials lack inherent dimensional limits and require additional scripting to include realistic dimensional limits and associated behaviour.

Workshop: 'rubber vase' design problem | Cybermodelling workshops are based on the Rubber Vase project, where a rubber strip containing two flex sensors, angled to gravity, acts as an analogue component electronically connected to a parametric B-Spline, representing a section of the vase. As the participants manually shape the rubber strip, gravitational pull alters the vase section in real time, teaching architectural design solution that results from an interplay between the design intent (manual modelling), site conditions (inclination), and material properties (flexibility) as illustrated in Figure 6.

The workshops introduce a unique complexity: 'live' design objects animated through computational spatiomateriality, in which digital materials continuously interact with spatial properties via microsensors. Thus, participants heuristically learn that architectural design is a negotiation with active, responsive materials in a dynamic environment. Once familiar with cybermodelling, students explore the variations determined by environmental sensor data to articulate the vase further (Fig. 7). The resulting vases are shaped manually and by site factors read parametrically, reflecting the interplay between design intent (manual site (spatial factors), and form (material properties), as illustrated in Figure 8.

The results of the experiments invite us to reflect on the current practice of digital design, re-evaluat-

ing its outcomes so far removed from real-world experience, and to emphasise two key points:

- 1) aligning the behaviour of digital objects with physical ones improves our ability to 'sensibly know' the objects we digitally design;
- 2) highlighting computational materiality provides the foundation for a material-based digital turn.

However, for the dissemination of cybermodelling with a hybrid analogue-digital approach, it is necessary to overcome the limitations that have emerged from experiments, primarily these are: the need to evolve current technologies and to acquire specialised yet widely diverse technical skills related to the construction of physical and computational models (Fig. 9) and the realisation of electronic circuits (Fig. 10), with which the designer must necessarily be engaged by constantly monitoring the quality of the results (Pye, 1968).

Conclusions | As spatial-material entities, computational and physical objects should not be treated as if they were present in a vacuum or an ideal space, as the digital environment today allows one to study and design considering the influence of the context on the physical-chemical characteristics of matter. By shaping the object within a 'bounded complexity', certain key elements considered relevant to the

complexity of the problem to be solved are selected to activate a design process that acts on the form of 'live objects' as they interact with surrounding phenomena. In this sense, the contribution innovates design practice by framing of problems as 'bounded complexities', inviting spatial and dynamic conditions of non-human ecologies and enabling these to intervene through non-verbal commands. Since materials possess an agency that extends far beyond objects as passive matter, it is appropriate to open up 'toward the things themselves' (Jacquet and Giraud, 2012), putting into practice concepts that have already been developed in the philosophical sphere (Delanda, 2015; Menges, 2007). Emphasising the possibilities, limits and characteristics of materials (analogue and digital): the autonomous capacity of the model to 'form itself', resonating with an emerging field of theory that ascribes agency to materials (Wolfram, 2002; Ingold, 2007).

Another contribution of this type of engaged architectural research is that it puts the undue emphasis on replicability in architectural science under scrutiny. The workshop activities on the rubber vase, which aim to stimulate skills and attitudes through practice, show how replicability is outweighed by the acquisition of the technique and the mastery of its use: different research results are not a sign of fail-

ure or inconsistency, but are instead desirable. In spatiomaterially active computational fields, architectural design requires relinquishing control or the assumption of perfect foresight; this is positive, given our cognitive limitations and the increasing complexity of current problems. The potential of cybermodels to operate with an 'other intelligence', beyond our own, is likely to lead to more effective solutions than we can process with our limited capabilities, helping us to shape the future of a built environment in collaboration with environmental systems.

Acknowledgements

The contribution results from the joint reflection of the Authors. However, the introduction, method, and characterising spatiomateriality sections, as well as the conclusions, are to be largely attributed to O. Paans, while the methodology workshops and sections on bounded complexity can be largely attributed to A. Iverson-Radtke.

References

- Bennett, J. (2004), "The Force of Things – Steps Towards an Ecology of Matter", in *Political Theory*, vol. 32, issue 3, pp. 347-372. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0090591703260853 [Accessed 30 September 2024].
- Čahtarević, R. and Proho, A. (2019), "Geometric modelling and complexity – A conceptual approach in architectural design and education", in *Spatium*, vol. 42, pp. 35-40. [Online] Available at: doi.org/10.2298/SPAT1942035C [Accessed 30 September 2024].
- Carpó, M. (2023), "Digitally Intelligent Architecture Has Little to Do with Computers (And Even Less with Their Intelligence)", in *ARQ (Santiago)*, vol. 113, pp. 19-31. [Online] Available at: dx.doi.org/10.4067/S0717-69962023000100018 [Accessed 30 September 2024].
- Carpó, M. (2017), *The Second Digital Turn – Design Beyond Intelligence*, The MIT Press, Cambridge.
- Carpó, M. (2011), *The Alphabet and the Algorithm*, The MIT Press, Cambridge.
- Colombino, L. and Childs, P. (2022), "Narrating the (non)human – Ecologies, consciousness and myth", in *Textual Practice*, vol. 36, issue 3, pp. 355-364. [Online] Available at: doi.org/10.1080/0950236X.2022.2030097 [Accessed 30 September 2024].
- DeLanda, M. (2015), "The new materiality", in *Architectural Design*, vol. 85, issue 5, pp. 16-21. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ad.1948 [Accessed 30 September 2024].
- Gandia, A., Iverson-Radtke, A., Payne, A. and Gupta, R. (2023), "Hybrid Making, Physical Explorations with Computational Matter", in Crawford, A., Diniz, N., Beckett, R., Vanucchi, J. and Swackhamer, M. (eds), *ACADIA 2023 – Habits of the Anthropocene – Scarcity and Abundance in a Post-Material Economy – Proceedings of the 43rd Annual Conference for the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) – University of Colorado, Denver (US), October 26-28, 2023*, vol. III, pp. 195-200. [Online] Available at: papers.cumincad.org/data/works/att/acadia23_v3_195.pdf [Accessed 30 September 2024].
- Hanna, R. and Paans, O. (2021), "Thought-Shapers", in *Cosmos and History | The Journal of Natural and Social Philosophy*, vol. 17, issue 1, pp. 1-72. [Online] Available at: cosmosandhistory.org/index.php/journal/article/view/923 [Accessed 29 November 2024].
- Harman, G. (2018), *Object-Oriented Ontology – A New Theory of Everything*, Penguin Books Ltd., London.
- Holland, J. H. (1992), Complex Adaptive Systems, in *Daedalus*, vol. 121, issue 1, pp. 17-30.
- Ingold, T. (2007), "Materials against materiality", in *Archaeological Dialogues*, vol. 14, issue 1, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1017/S1380203807002127 [Accessed 30 September 2024].
- Iverson-Radtke, A. (2022), *Rabbithole to hybrid – Finding Digital Spatiomateriality Through Hybrid Modelling*, Doctoral Thesis, Technical University of Berlin, Germany. [Online] Available at: doi.org/10.14279/depositononce-15983 [Accessed 30 September 2024].
- Jacquet, B. and Giraud, V. (eds) (2012), *From the Things Themselves – Architecture and Phenomenology*, Kyoto University Press, Kyoto.
- Jahn, G., Morgan, T. and Roudavski, S. (2014), "Mesh agency", in Gerber, D., Huang, A. and Sanchez, J. (eds), *ACADIA 2014 – Design Agency – Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), USC School of Architecture, Los Angeles (US), October 23-25, 2014*, Riverside Architectural Press, Cambridge (CA), pp. 135-144. [Online] Available at: papers.cumincad.org/data/works/att/acadia14_135.content.pdf [Accessed 30 September 2024].
- Lynn, G. (1999), *Animate Form*, Princeton University Press, Princeton.
- Menges, A. (2007), "Computational Morphogenesis – Integral Form Generation and Materialization Processes", in Okeil, A., Al-Attili, A. and Mallasi, Z. (eds), *Em'body'ing Virtual Architecture – The Third International Conference of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design (ASCAAD 2007), Alexandria, Egypt, 28-30 November 2007*, pp. 725-744. [Online] Available at: papers.cumincad.org/data/works/att/ascaad2007_057.content.pdf [Accessed 30 September 2024].
- Morton, T. (2013), *Hyperobjects – Philosophy and Ecology after the End of the World*, University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Paans, O. (2022), "Ontogenesis as Model for Design Processes", in Lockton, D., Lenzi, S., Hekkert, P., Oak, A., Sádaba, J. and Lloyd, P. (eds), *DRS 2022 – Bilbao, Spain, 25 June-3 July, 2022*, Design Research Society, London, pp. 1-16 [Online] Available at: doi.org/10.21606/drs.2022.280 [Accessed 30 September 2024].
- Paans, O., Pasel, R. and Ehlen, B. (2019), "Architectural Representation, the Controlled Future and Spatial Practice", in Tofte, A. E., Rönn, M. and Wergeland, E. S. (eds), *Reflecting Histories and Directing Futures*, Proceedings Series 2019, vol. 1, Nordic Academic Press of Architectural Research, Förlagssystem, pp. 203-228. [Online] available at: adk.elsevierpure.com/ws/portalfiles/portal/63417097/115_20_PB.pdf [Accessed 30 September 2024].
- Picon, A. (2004), "Architecture and the Virtual – Towards a New Materiality", in *PRAXIS*, vol. 6, pp. 114-121. [Online] Available at: celop.pbworks.com/w/file/97219107/Picon-Architecture%20and%20the%20Virtual,%20PRAXIS.pdf [Accessed 30 September 2024].
- Pye, D. (1968), *The Nature and Art of Workmanship*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Simondon, G. (2017), *On the mode of existence of technical objects* [or. ed. *Du mode d'existence des objets techniques*, 1958], University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Spuybroek, L. (2011), *The Sympathy of Things – Ruskin and the Ecology of Design*, V2_Publishing, Rotterdam.
- Wolfram, S. (2002), *A new kind of science*, Wolfram Media, Champaign.