

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

Rosa Romano, Elisa Belardi, Paola Gallo, Dario Luigi Distefano

ABSTRACT

Le filiere di produzione edile stanno affrontando una profonda trasformazione in chiave ecologica e digitale con l'obiettivo di sostenere la competitività e la resilienza del settore nei confronti delle sfide ambientali e socioeconomiche in atto. Negli ultimi anni lo sviluppo delle tecnologie digitali ha aperto il campo alla possibilità di trasformare gli impianti per la produzione edilizia prefabbricata in sistemi di Industria 4.0 altamente integrati, controllati ed efficienti sotto il profilo economico e ambientale. La ricerca CARES si inserisce nel dibattito in atto sviluppando e implementando un innovativo modello di produzione di elementi costruttivi realizzati in cartone ondulato, basato sul principio della digitalizzazione di prodotto-processo, attraverso l'utilizzo di strumenti BIM, finalizzato a razionalizzare l'uso delle risorse e a ridurre il carico ambientale della fase realizzativa.

Construction production chains are facing a profound ecological and digital transformation to support the competitiveness and resilience of the sector against ongoing environmental and socio-economic challenges. In recent years, the development of digital technologies has opened the field to the possibility of transforming prefabricated building production facilities into highly integrated, controlled, environmentally and economically efficient Industry 4.0 systems. CARES research is part of the ongoing debate, developing and implementing an innovative production model of construction elements made of corrugated cardboard, based on the principle of product-process digitalization through the use of BIM tools, aimed at rationalizing the use of resources and reducing the environmental burden of the construction phase.

KEYWORDS

industria 4.0, prefabbricazione, personalizzazione di massa, architettura di cartone, architettura di emergenza

industry 4.0, prefabrication, mass customization, cardboard architecture, emergency architecture

Rosa Romano, Architect and PhD, is an Associate Professor at the DiDA Department of the University of Florence (Italy). Her research focuses on the themes of bioecological architecture and innovative technologies for the environment, with particular attention to the management of complex building processes. Email: rosa.romano@unifi.it

Elisa Belardi, Architect and PhD in Architectural Technologies at the Department of Architecture, University of Florence (Italy), carries out research on digital transformation of the building process, with particular reference to prefabricated production systems and innovations in industrial 4.0 systems E-mail: elisa.belardi@unifi.it

Paola Gallo is an Associate Professor of Architecture Technology at the DiDA Department of the University of Florence (Italy) and the Scientific Secretary of the ABITA Centre; she carries out research activity in the thematic field of technical and technological innovation in the architectural project. Email: paola.gallo@unifi.it

Dario Luigi Distefano, Engineer and PhD, is the Founder of the innovative SME Archicart® for which he directs the technical and R&D department. He is an expert in low-tech building systems. E-mail: dariodistefano@archicart.com



Negli ultimi decenni la crescita demografica e la rapida urbanizzazione di molte aree del pianeta hanno determinato un'ingente espansione infrastrutturale ed economica del settore Architecture, Engineering and Construction (AEC), riaccendendo il dibattito sull'effetto provocato da tale sviluppo sugli ecosistemi naturali e antropici. Gli studi di settore stimano che il comparto edile sia ad oggi tra i settori economici maggiormente impattanti sull'ambiente (Guo et alii, 2019).

Un recente rapporto dell'International Energy Agency stabilisce che al solo settore delle costruzioni è attualmente imputabile il 36% del fabbisogno energetico e il 39% delle emissioni di CO₂ su scala globale (Global Alliance for Buildings and Construction, 2019; International Energy Agency and the United Nations Environment Programme, 2019). Inoltre il duplice binomio transizione ecologica-digitale, stimolato dalla programmazione comunitaria e nazionale attraverso numerosi programmi di finanziamento – Next Generation Europe (European Parliament, 2020), Horizon Europe (European Commission, 2019) e il recente PNRR (Ministero dello Sviluppo Economico, 2021) – nonché l'affermazione di modelli di sviluppo basati sui concetti di economia sostenibile e circolare (Ellen MacArthur Foundation, 2013), richiamano la necessità imminente e prorogabile per il comparto AEC di ripensare e innovare profondamente le tecniche, gli approcci e i metodi tradizionali di gestione dei processi edilizi per raggiungere il macro-obiettivo del 'disaccoppiamento', svincolando lo sviluppo economico del settore dallo sfruttamento intensivo delle risorse (Gusmerotti, Frey and Iraldo, 2020).

La questione ambientale è infatti intrinsecamente connessa all'inefficienza degli attuali strumenti e metodi di gestione delle filiere costruttive, che ad oggi risultano estremamente parcellizzate e incapaci di gestire la crescente complessità delle opere edilizie (Wang et alii, 2020). In primo luogo ciò è causato dall'adozione di approcci tradizionali alla costruzione, basati ancora sulla centralità del cantiere come luogo privilegiato in cui avviene gran parte delle sequenze realizzative (Galluccio, 2019). In secondo luogo le problematiche gestionali dei processi edilizi risultano come conseguenza di uno scarso livello di digitalizzazione coinvolto nella gestione del ciclo di vita degli edifici, superiore soltanto ai settori della caccia e dell'agricoltura (Agarwal, Chandrasekaran and Sridhar, 2016). Le conseguenze sono una limitata capacità di prevedere e controllare i processi edilizi, con frequente presenza di errori e difetti di realizzazione delle opere, diminuzione della qualità e delle prestazioni in opera, dilatazione dei tempi e dei costi di intervento (Abanda, Tah and Cheung, 2017).

In questo scenario la produzione edilizia prefabbricata rappresenta una modalità realizzativa che asseconda le esigenze di controllo, prevedibilità e razionalizzazione dei processi edilizi (Du et alii, 2019). Un tema, quello della prefabbricazione, che oggi si rinnova in virtù delle innovazioni introdotte dalla Quarta Rivoluzione Industriale, abilitata da una sempre maggiore compenetrazione tra mondo fisico e digitale (Oesterreich and Teutenberg, 2016). Negli ultimi anni tale trasformazione ha portato all'affermazione del modello produttivo Industria 4.0, che risulta ormai ampiamente consolidato in settori come l'automotiv o l'industria aerospaziale; impianti produttivi altamente tecno-

logici ed efficienti, all'interno dei quali i macchinari e gli strumenti di progetto-fabbricazione risultano interconnessi e messi a sistema attraverso l'uso di tecnologie digitali come l'Artificial Intelligence e l'Internet of Things (Clyde & Co, 2018). Le cosiddette 'smart factories' sono ecosistemi capaci di sviluppare prodotti con elevati standard qualitativi, adattabili secondo logiche di customizzazione di massa, ottimizzando contemporaneamente le risorse utilizzate per ridurre la produzione di rifiuti ed emissioni climateranti.

Partendo da queste riflessioni, il paper presenta gli esiti della ricerca CARES (CArdbord RElocatable School unit), che ha sviluppato un modello scalabile e replicabile per l'industrializzazione 4.0 della produzione di elementi costruttivi realizzati in cartone ondulato, integrando il paradigma della digitalizzazione e di metodologie e strumenti BIM, con l'obiettivo di razionalizzare l'uso delle risorse e ridurre il carico ambientale delle fasi di lavorazione di un materiale sostenibile quale il cartone, ancora poco utilizzato nel settore delle costruzioni, se non in sporadici casi in cui la sua produzione e messa in opera è stata affidata a metodologie realizzative di tipo artigianale.

Lo stato dell'arte dell'uso del cartone ondulato nel settore delle costruzioni

Le attuali tendenze di innovazione nel settore delle costruzioni sono strettamente connesse con le sperimentazioni condotte negli ultimi decenni su materiali e tecnologie costruttive tradizionalmente low-tech, che impiegano risorse ad elevata eco-compatibilità e ridotto carico ambientale (Giglio, 2018). A questo filone di ricerca si possono ricondurre le esperienze relative all'uso del cartone ondulato in edilizia: un materiale a base di fibra di cellulosa, composto da strati sovrapposti di fogli di carta tesa e strati di fogli ondulati, normalmente utilizzato nel settore degli imballaggi per il trasporto di oggetti.

In anni recenti, grazie alla combinazione di proprietà quali resistenza meccanica, leggerezza e versatilità, l'uso del cartone è stato nobilitato nel settore dell'architettura nell'ambito di diversi e interessanti progetti sperimentali. Tra questi si ricordano le realizzazioni di Shigeru Ban e del gruppo Voluntary Architects Network (Ban and Keio University SFC Ban Laboratory, 2010) che, con la Paper Dome, realizzata a Kobe dopo il terremoto del 1995, smontata e rimontata a Taiwan nel 2005, dove attualmente è in uso, (Jodidio, 2015), e la Paper Partition System (2004), anch'essa costruita per rispondere all'esigenza di fornire spazi abitativi di primo soccorso, dimostrano come sia possibile usare elementi tubolari in cartone con funzione strutturale portante per realizzare componenti costruttivi versatili e facilmente assemblabili. Anche le ricerche sviluppate in Olanda dallo studio Fiction Factory, che ha progettato il prototipo abitativo Wickelhouse¹ utilizzando una struttura portante di cartone ondulato stratificato, e dall'Università di Delft, che ha condotto la ricerca Temporary Emergency Cardboard House (TECH), hanno permesso di testare e validare le prestazioni di sistemi di involucro alveolari realizzati in cartone (Latka, 2017).

I casi studio sopra descritti dimostrano che, nonostante l'enorme potenzialità del cartone (basso impatto ambientale e buone prestazioni termoigrometriche e meccaniche), l'utilizzo di questo materiale è ancora limitato nel settore delle

costruzioni ed è, inoltre, prevalentemente riconducibile a processi costruttivi di impronta puramente artigianale, con conseguente diminuzione dell'efficienza e della sostenibilità delle fasi di realizzazione e messa in opera: presenza di errori, aumento degli sprechi di materiale e rifiuti, aumento dei tempi e dei costi di produzione.

I pannelli PACOTEC™ | Partendo dalle riflessioni inerenti all'analisi dello stato dell'arte e dalla convinzione che le potenzialità insite nell'utilizzo del cartone possano essere incrementate attraverso l'ottimizzazione e la digitalizzazione dei processi di produzione abitualmente utilizzati, la ricerca CARES è stata finalizzata all'individuazione di un partner industriale già coinvolto nella realizzazione off-site di componenti tecnologici realizzati proprio con questo materiale. È con tale obiettivo che, dopo un'attenta analisi di mercato condotta nella fase conoscitiva, è stata selezionata l'azienda Archicart® che attualmente risulta essere l'unica impresa italiana a produrre sistemi modulari in cartone ondulato utilizzabili nel settore delle costruzioni, anche e soprattutto attraverso interessanti sperimentazioni che dimostrano l'applicabilità della tecnologia a processi basati sull'autocostruzione e sulla reversibilità dei sistemi edilizi.

In particolare l'azienda ha sviluppato un innovativo sistema di pannelli prefabbricati di cartone ondulato (PACOTEC™), attualmente realizzati con un metodo brevettato standardizzato (seppur personalizzabile nelle dimensioni e nelle finiture), che permette di assemblarli a secco per la costruzione di pareti divisorie interne (fisse o mobili), rivestimenti e pareti di tamponamento esterne (anche con funzione strutturale).

Ogni pannello è composto da una serie di scatolari (TB) in cartone ondulato a sezione rettangolare, fissati tra loro con colla e rivestiti da un ulteriore strato a sezione rettangolare costituito da due fogli esterni (FE) in cartone (Fig. 1). Alle estremità superiori e inferiori il pannello presenta varie soluzioni di chiusura in relazione alla sua funzione: nel caso delle pareti strutturali (oggetto della ricerca), le chiusure sono realizzate da tavole in legno lamellare dotate di innesti per il collegamento interno dei tubolari, e assolvono anche alla funzione strutturale di ripartizione dei carichi e di collegamento dei pannelli tra loro e con le strutture di fondazione e di copertura.

La sezione resistente cava può essere riempita con materiale coibente termico e/o acustico a basso impatto ambientale (fibra di cellulosa, argilla espansa o pannelli di fibra di legno), per garantire il raggiungimento delle prestazioni termoigrometriche richieste dalla normativa per l'efficienza energetica. Il coating finale delle superfici esterne è realizzato con vernici ad acqua che permettono di incrementare le proprietà termoigrometriche del materiale senza alterarne l'impatto ambientale. L'intero sistema è pensato per essere totalmente disassemblato a fine ciclo vita e riciclato in ogni sua parte.

I pannelli PACOTEC™ sono già stati oggetto di campagne sperimentali per testarne le prestazioni meccaniche e fisiche, attraverso: 1) prove di carico di compressione centrato fino a 7 tonnellate, peso dopo il quale si manifesta rottura per instabilità locale; 2) test e verifica delle prestazioni termoigrometriche e di durabilità in ambiente esterno attraverso la realizzazione di un prototipo



Fig. 1 | Three-dimensional exploded view of the PACOTECH™ panel (credit: Archicart®, 2019).

di unità abitativa di 25 mq (Figg. 2, 3) monitorato per un anno (dal 2018 al 2019) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università degli Studi di Catania (Fig. 4; Distefano, 2019) e nel 2020 presso l'Université de Corse, Ecole d'Ingénieurs PAOLI-Tech (Fig. 5).

La ricerca CARES | Come precedentemente ricordato, l'obiettivo generale della ricerca CARES è stato quello di sviluppare un nuovo modello di processo produttivo di componenti tecnologici realizzati in cartone ondulato, scalabile e replicabile, progettato in accordo con le esigenze del partner industriale selezionato e nel rispetto dei paradigmi dell'Industria 4.0, basato sull'utilizzo di metodologie BIM e sull'adozione di un approccio file-to-factory e lean alla gestione (approvvigionamento dei materiali, controllo e verifica del progetto, fabbricazione e assemblaggio) della produzione finalizzato a: 1) valorizzare le capacità computazionali dei sistemi IT; 2) ottimizzare l'uso delle materie prime e la riduzione della produzione di rifiuti; 3) migliorare il controllo qualitativo del prodotto; 4) favorire la customizzazione di massa del sistema; 5) aumentare il coordinamento tra le diverse fasi del processo.

Sul piano metodologico lo sviluppo della ricerca è stato portato avanti circoscrivendo il campo di indagine rispetto al processo di produzione dei pannelli prefabbricati PACOTECH™, descritti nel paragrafo precedente. L'azienda Archicart® ha messo a disposizione le proprie competenze tecniche, le strumentazioni e il proprio know-how per supportare il trasferimento e l'implementazione sul campo delle proposte elaborate nella fase teorico-sperimentale.

L'analisi del processo di progettazione e produzione dei pannelli PACOTECH™ è stata condotta attraverso la documentazione tecnica messa a disposizione dall'azienda e tramite l'osservazione diretta del processo all'interno dello stabilimento produttivo, con l'obiettivo di definire un diagramma di flusso (Fig. 6) che mettesse a sistema le sequenze, gli attori, gli strumenti coinvolti in ciascuna fase del processo. Rispetto a tale workflow sono stati individuati i seguenti elementi di criticità da correggere per ottimizzarne il processo produttivo in ottica 4.0: 1) scarsa integrazione tra le fasi produttive e gli strumenti utilizzati nello sviluppo delle sequenze; 2) limitata flessibilità del processo per accogliere le istanze di customizzazione del prodotto; 3) gestione del magazzino non coordinata con la produzione; 4) elevata componente di interazione manuale per l'elaborazione dei dati di input di fabbricazione (distinta dei pezzi e istruzioni di lavorazione); 5) elevato rischio di errori di produzione.

A partire dagli input conoscitivi la seconda fase della ricerca ha previsto la progettazione di un nuovo modello di processo ottimizzato e razionalizzato, da adottare per la gestione delle attività di progettazione e prefabbricazione del sistema costruttivo (Fig. 7). In particolare il nuovo workflow proposto è stato sviluppato attraverso la digitalizzazione di prodotto e l'automazione di processo, strutturando le sequenze produttive in modo da minimizzare gli sprechi e gli scarti di produzione (Lekan et alii, 2020). Nel dettaglio, l'integrazione tra le diverse fasi e gli attori coinvolti nel processo è stata ottenuta attraverso l'impiego di un software di modellazione di BIM, estendendone

la funzionalità e testandone l'applicazione anche alla razionalizzazione delle variabili di produzione, quali: 1) l'elaborazione automatizzata della distinta dei pezzi per la gestione degli ordini; 2) il calcolo delle istruzioni di fabbricazione da inviare in input ai macchinari di lavorazione; 3) l'ottimizzazione delle fasi di approvvigionamento del materiale rispetto alle caratteristiche del progetto.

La ricerca ha, infine, previsto una fase di effettiva implementazione all'interno dell'azienda, attraverso l'applicazione del nuovo modello organizzativo e la digitalizzazione del processo produttivo del sistema PACOTECH™, declinato nelle tre tipologie base: verticale, sagomato e orizzontale. Inizialmente è stata operata una discretizzazione dei dati caratterizzanti il pannello secondo elementi invarianti del sistema, dettati da vincoli tecnologici e di produzione, e parametri variabili e personalizzabili (Fig. 8).

Successivamente è stata sviluppata la modellazione parametrica degli elementi principali e secondari del sistema costruttivo attraverso il software BIM Autodesk® Revit, secondo la struttura dei dati schematizzata nella Figura 9 e con un livello di approfondimento dei dati (LOD, norma UNI 11337-4:2017) corrispondente al LOD C: oggetto definito; sono state perciò create delle cosiddette 'famiglie', ovvero file con estensione .rfa (Fig. 10) che costituiscono un 'kit' di componenti digitali caricabili, adattabili e che possono essere scambiati tra diversi dispositivi digitali. All'interno dei modelli digitali sono stati inseriti non solo i parametri che regolano le opzioni di personalizzazione morfologica e dimensionale dei pannelli e degli elementi di completamento, ma anche degli algoritmi che, a partire dai dati di input operano automaticamente un processo di nesting semplificato, ottimizzando il numero e le dimensioni dei fogli di cartone rispetto alle caratteristiche dei pannelli (Fig. 11).

All'interno dei modelli digitali sono state, inoltre, predisposte formule di calcolo automatizzato delle istruzioni di fabbricazione, nella forma di un elenco di coordinate che vengono inviate, attraverso opportuni file di interscambio, ai macchinari per la lavorazione. Infine i dati dal modello sono stati raccolti in una serie di abachi pre-settati all'interno di un modello di progetto del software (file con estensione .rte), utilizzato come un configuratore all'interno del quale: 1) caricare e personalizzare i disegni digitali dei pannelli; 2) gestire le variabili legate all'ordine del materiale secondo dimensioni ottimizzate; 3) inviare le istruzioni esecutive agli strumenti di lavorazione.

Sviluppo della fase di test e verifica attraverso un caso studio

Come prima ricordato, la metodologia adottata per la fase di test è stata basata sul caso studio, verificando la validità dell'ottimizzazione del processo di produzione dei pannelli PACOTECH™ attraverso il loro utilizzo per la realizzazione prototipale di un'unità scolastica temporanea, realizzata con pareti portanti in pannelli prefabbricati in cartone. La scelta funzionale è stata motivata dalla domanda crescente di spazi scolastici accessori (reversibili, leggeri e facilmente assemblabili) durante la recente crisi pandemica. A partire dai file di famiglia editati all'interno del modello di progetto (Fig. 12) sono stati customizzati e aggregati dei modelli digitali di pannelli prefabbricati in cartone ondulato, esplorandone così

le alternative dimensionali e funzionali. Tale comparazione ha portato alla selezione della configurazione rappresentata in Figura 13, ritenuta quella maggiormente rispondente al quadro esigenziale di partenza.

Il modello BIM ha permesso di estrapolare in maniera automatizzata tutti i dati necessari a gestire la produzione dei componenti dell'unità scolastica, e in particolare: a) la distinta dei pezzi da produrre, ovvero il numero e le dimensioni esatte dei fogli di cartone; b) l'elenco ordinato dei dati di input per avviare la lavorazione, cioè una sequenza di coordinate che descrivono il percorso degli utensili di taglio e cordonatura.

La fase successiva ha riguardato l'analisi delle funzionalità del modello BIM per la potenziale riduzione del consumo di materiale. Operativamente la metodologia di lavoro ha previsto di comparare sei scenari, corrispondenti ad altrettante combinazioni dimensionali dei fogli di cartone necessari a produrre i quattro tubolari presenti all'interno del pannello, sfruttando il calcolo automatizzato impostato all'interno di uno degli abachi di computo nel modello di progetto per ottimizzare progressivamente lo scarto di materia prima. Il funzionamento dell'abaco si attiva, infatti, a partire dall'inserimento delle dimensioni dei fogli di cartone in due campi a compilazione libera e selezionando la direzione di immissione dei fogli in macchina. A partire dagli input, gli algoritmi preimpostati all'interno dell'abaco restituiscono il calcolo del consumo di materiale (superficie in metri quadri) e il relativo costo, aggregando i pezzi da produrre all'interno di un foglio fino alle dimensioni massime disponibili.

Le combinazioni testate (compresa quella attuale) sono state quindi ottenute facendo diminuire progressivamente la dimensione del foglio e facendo variare l'altezza del giunto di separazione verticale, che è necessario inserire per i pannelli con altezza superiore alla dimensione massima del foglio (Tabella 1). La comparazione delle varie combinazioni ha permesso di osservare che, rispetto all'attuale gestione della produzione e del magazzino, con il nuovo modello gestionale CARES si può arrivare ad avere una riduzione del consumo totale di cartone pari al 54.84% (combinazione TB-05) rispetto alla soluzione di partenza (combinazione TB-01).

Conclusioni | I risultati della ricerca CARES hanno dimostrato come l'adozione di approcci e strumenti gestionali basati sul principio della duplice digitalizzazione di prodotto-processo, consente di ottenere un aumento generalizzato dell'efficienza e della sostenibilità ambientale del processo realizzativo, ottimizzando il consumo di materiale e riducendo gli scarti di produzione.

Contemporaneamente l'impiego di piattaforme BIM per la gestione dei flussi informativi permette di aggregare le diverse fasi e i vari attori coinvolti nella filiera integrando alla gestione del processo edilizio le fasi di progetto e fabbricazione dei componenti secondo un approccio file-to-factory; ciò comporta una sostanziale riduzione degli errori di fabbricazione, consentendo di aumentare il controllo sulla qualità del prodotto finale e di allineare le prestazioni (tecnico-costruttive, energetiche e di durabilità) verificate in fase di progetto a quelle del manufatto realizzato. Inoltre l'automazione delle sequenze di produzione e assemblag-

gio presuppone la riduzione della componente di interazione tra la manodopera ed i macchinari, con conseguente aumento della sicurezza per gli operatori a cui vengono demandate le sole attività di controllo e supervisione del processo.

Il nuovo modello di processo risulta automaticamente riconfigurabile per accogliere le esigenze di adattabilità e personalizzazione del prodotto, in un'ottica di customizzazione di massa. Le modifiche morfologiche e dimensionali sui componenti, necessarie a garantire l'utilizzabilità del prodotto in contesti diversificati, vengono infatti recepite dalle strumentazioni in maniera automatizzata, senza necessità di riprogrammare manualmente il processo e/o di modificarne le sequenze di sviluppo; ciò permette di allineare i costi della produzione su misura a quelli di una produzione in serie, superando i tradizionali limiti dell'industrializzazione edilizia intesa come fabbricazione di massa di elementi standardizzati.

Rispetto allo stato dell'arte la ricerca ha formalizzato un processo produttivo scalabile e replicabile, basato sul paradigma della trasformazione digitale, che permette di incrementare la produttività dell'impianto e di superare i limiti tradizionalmente legati al carattere sperimentale della realizzazione di manufatti prefabbricati in cartone ondulato. I risultati sono indirizzati agli operatori della filiera costruttiva prefigurando la possibilità di avviare una trasformazione digitale per efficientare la produzione, ridurre il carico ambientale della produzione e sostenere gli obiettivi di resilienza del comparto AEC per far fronte all'attuale crisi delle risorse.

Nella prima fase della ricerca, l'implementazione del modello di processo ha coinvolto i soli aspetti di gestione digitalizzata attinenti alle fasi di progettazione e fabbricazione-assemblaggio dei componenti; le prossime fasi riguarderanno la sperimentazione dell'estensione del controllo BIM alla gestione dell'intero ciclo di vita del prodotto, a partire dall'approvvigionamento dei materiali, alla verifica prestazionale (strutturale, energetica, di valutazione dell'impatto LCA), fino alla fase di fine vita e re-immissione delle risorse in altre catene di valore.

I prossimi step prevedono la realizzazione del prototipo CARES e il suo monitoraggio alla scala reale, in relazione alla fase di produzione e messa in opera, oltre che al controllo delle sue prestazioni energetiche e funzionali, con l'auspicio che la realizzazione di sistemi edilizi realizzati con componenti di cartone ondulato, possa superare la fase sperimentale ed essere considerata una nuova forma di costruzione sostenibile, capace di favorire i progressi di transizione digitale ed ecologica indicati anche dalle politiche energetiche internazionali.

In recent decades, population growth and the rapid urbanization of many global areas have led to a huge infrastructural and economic expansion of the Architecture, Engineering and Construction (AEC) sector, rekindling the debate on the effect caused by this development on natural and anthropogenic ecosystems. Industry studies estimate that the construction sector is today among the most environmentally impactful economic sectors to date (Guo et alii, 2019).



Fig. 2 | Detail of the prototype of a T-Box prefabricated housing unit in corrugated cardboard made with PACOTECH™ port structural load-bearing panels (credit: Archicart®, 2018).

Fig. 3 | Environmental quality monitoring phases within the T-Box prototype (credit: Archicart®, 2018).

Fig. 4 | Construction site for the installation of a prefabricated unit made with PACOTECH™ panels at the University of Corsica, Ecole d'Ingenieurs PAOLI-Tech (credit: Archicart®, 2020).

Fig. 5 | The prefabricated cardboard unit, installed at the University of Corsica, is currently in the energy-environmental monitoring phase (credit: Archicart®, 2020).

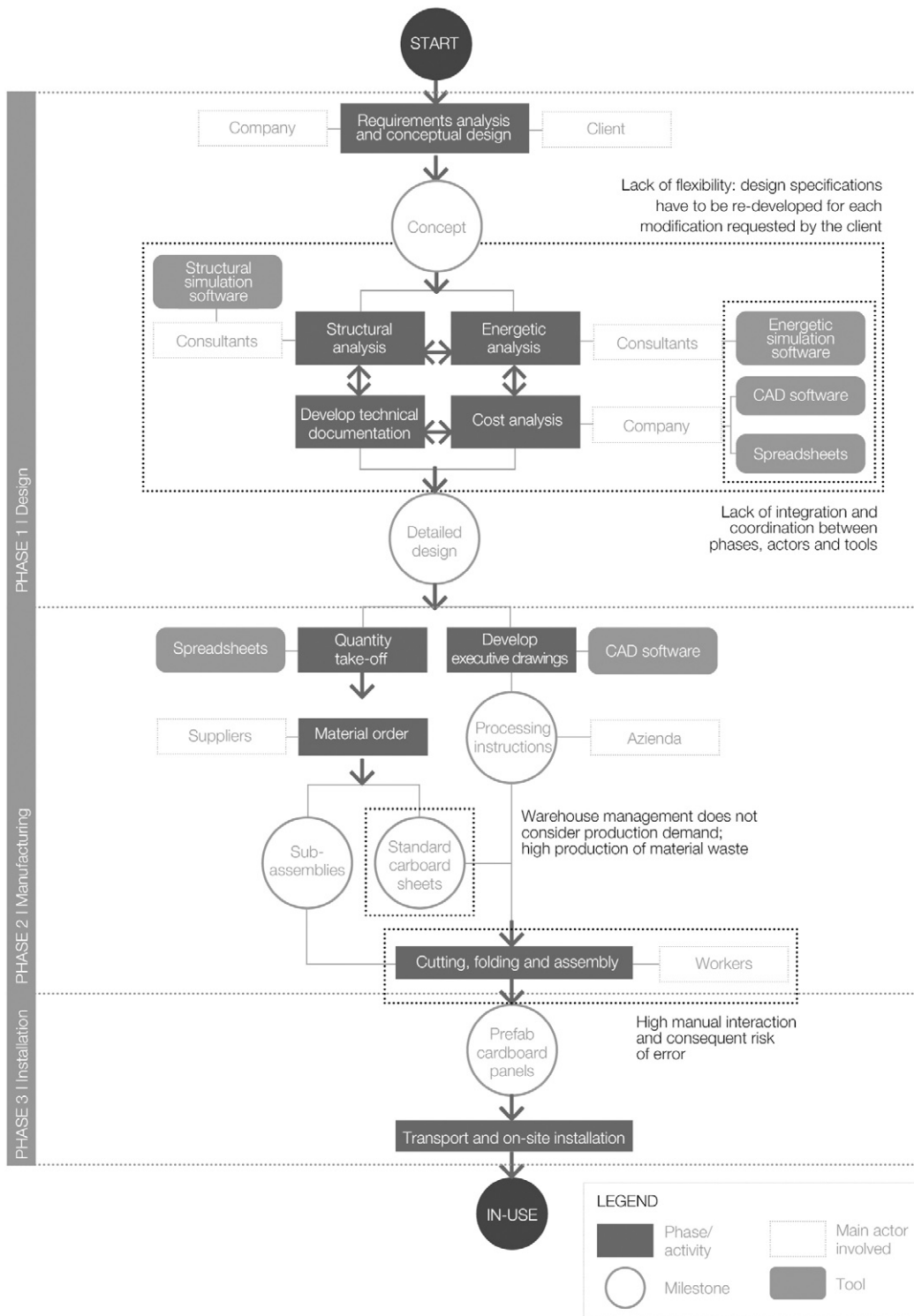


Fig. 6 | Flowchart summarizing the current design and manufacturing process of prefabricated panels (credit: E. Belardi, 2021).

A recent report by the International Energy Agency establishes that the construction sector alone is currently responsible for 36% of energy needs and 39% of CO₂ emissions on a global scale (Global Alliance for Buildings and Construction, 2019; International Energy and the United Nations Environment Programme, 2019). In addition, the dual binomial ecological-digital transition, stimulated by EU and national programming through numerous funding programs – Next Generation Europe (European Parliament, 2020), Horizon Europe (European Commission, 2019) and the recent PNRR (Ministero dello Sviluppo Economico, 2021) – as well as the affirmation of

development models based on the concepts of sustainable and circular economy (Ellen MacArthur Foundation, 2013), draw attention to the imminent and urgent need for the AEC sector to rethink and profoundly innovate traditional techniques, approaches, and methods of managing construction processes. This is necessary to achieve the macro-objective of ‘decoupling’, thus freeing the economic development of the sector from the intensive exploitation of resources (Gusmerotti, Frey and Iraldo, 2020).

The environmental issue is intrinsically connected to the ineffectiveness of the current tools and methods of managing construction supply

chains, which to date are extremely fragmented and unable to deal with the increasing complexity of construction projects (Wang et alii, 2020). Firstly, this is caused by the adoption of traditional approaches to construction, still based on the centrality of the construction site as a privileged place where most of the construction sequences take place (Galluccio, 2019). Furthermore, the management issues related to building processes are a direct consequence of the low level of digitalization involved in building lifecycle management, superior only to the hunting and agriculture sectors (Agarwal, Chandrasekaran and Sridhar, 2016). The effects are reflected in a limited ability to predict and control building processes, with a frequent presence of construction errors and defects, a decrease in quality and work performance, and an increase in the time and costs of intervention (Abanda, Tah and Cheung, 2017).

In this scenario, prefabricated building production represents a construction method that fulfils the demands for control, predictability and rationalisation of building processes (Du et alii, 2019). Prefabrication is a theme that is being renewed today through innovations introduced by the Fourth Industrial Revolution, enabled by an increasing interpenetration between the physical and digital worlds (Oesterreich and Teuteberg, 2016). In recent years, this transformation has led to the affirmation of the Industry 4.0 production model, which is now widely consolidated in sectors such as the automotive or aerospace industry; highly technological and efficient production facilities, within which machinery and design-manufacturing tools are interconnected and systemized through the use of digital technologies such as Artificial Intelligence and the Internet of Things (Clyde & Co, 2018). The so-called ‘smart factories’ are ecosystems capable of developing products with high-quality standards, adaptable according to mass customisation approaches while optimising the resources used to reduce waste and climate-changing emissions.

Based on these considerations, the paper presents the results of the CARES research (Cardboard RElocatable School unit), which developed a scalable and replicable model for the industrialization 4.0 of the production of construction elements made of corrugated cardboard. This model integrates the paradigm of digitalization and BIM methodologies and tools, with the aim of rationalizing the use of resources and reducing the environmental burden of the processing phases of sustainable material such as cardboard, still rarely used in the construction sector, except in isolated cases where production and implementation are carried out through artisanal methodologies.

The use of corrugated cardboard in the construction industry | The current innovation trends in the construction sector are closely connected with the experiments carried out in recent decades on traditionally low-tech materials and construction technologies, which employ resources with high eco-friendliness and reduced environmental burden (Giglio, 2018). Experiences related to the use of corrugated cardboard in construction can be traced back to this line of research: a cellulose fibre-based material composed of over-

lapping layers of stretched paper sheets and layers of corrugated sheets, normally used in packaging for the transportation of objects.

In recent years, thanks to the combination of properties such as mechanical strength, lightness and versatility, the use of cardboard has been ennobled in the architectural sector as part of several interesting experimental projects. These include the projects by Shigeru Ban and the Voluntary Architects Network (Ban and Keio University SFC Ban Laboratory, 2010) such as the Paper Dome, built in Kobe after the earthquake of 1995 and disassembled and reassembled in Taiwan in 2005, where it is currently in use (Jodidio, 2015), and the Paper Partition System (2004), also built to meet the demand for first aid living spaces. These projects demonstrate how it is possible to use tubular cardboard elements with a load-bearing structural function to create versatile and easily assembled construction components. Research developed in Holland by the Fiction Factory studio, which designed the Wikkelhouse housing prototype¹ using a load-bearing structure made of laminated corrugated cardboard, and by the University of Delft, which conducted the Temporary Emergency Cardboard House (TECH) research, also enabled testing and validation of the performance of honeycomb envelope systems made of cardboard (Latka, 2017).

The aforementioned case studies show that, despite the enormous potential of cardboard (low environmental impact and good thermo-hygrometric and mechanical performance), the use of this material is still limited in the construction sector and is, moreover, mainly attributable to construction processes with a purely artisanal imprint, resulting in a decrease in the efficiency and sustainability of the construction and commissioning stages and thus displaying the presence of errors, increased waste of material and refuse, and increased production time and costs.

The PACOTEC panels™ | Drawing on the considerations regarding the analysis of the state of the art and the belief that the inherent potential in the use of cardboard could be increased through the optimization and advanced digitalization of regularly used production processes, CARES research aimed to identify an industrial partner already involved in the off-site production of technological components made from this very material. Archicart® was selected with this objective following a careful market analysis conducted in the cognitive phase, resulting the only Italian company to currently produce modular corrugated cardboard systems that can be used in the construction sector, also and above all through interesting experiments that demonstrate the applicability of technology to processes based on self-construction and the reversibility of building systems.

Specifically, the company developed an innovative system of prefabricated corrugated cardboard panels (PACOTEC™), which are currently made using a standardized patented method (though customizable in size and finish) that allows for their dry assembly in the construction of interior partition walls (fixed or movable), cladding and exterior curtain walls (including those with a structural function).

Each panel (Fig. 1) is composed of a series of corrugated cardboard boxes (TB) with a rectan-

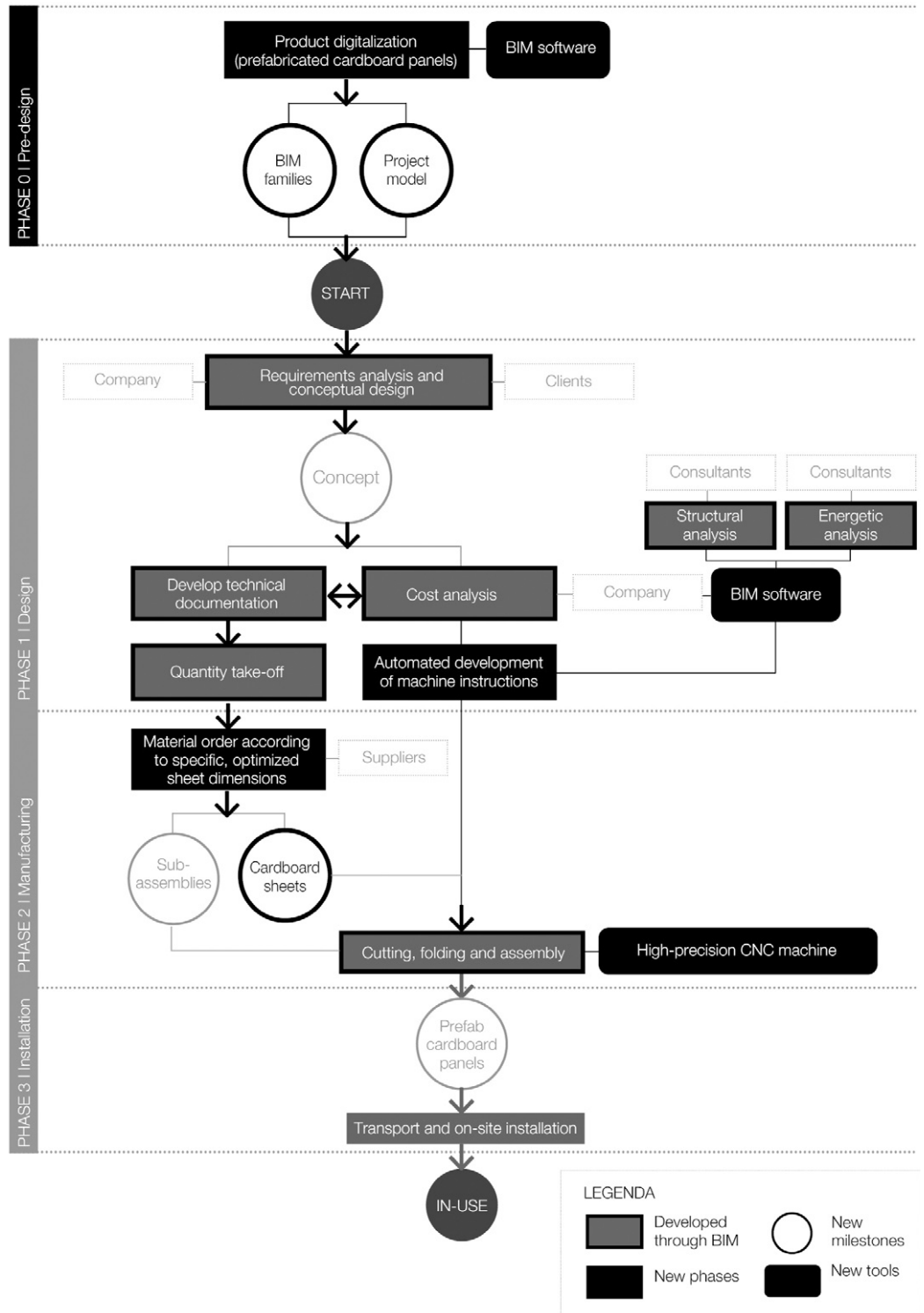


Fig. 7 | Flowchart summarizing the new process developed for the design and production of prefabricated panels (credit: E. Belardi, 2021).

gular section, fastened together with glue and coated with an additional rectangular section layer consisting of two outer cardboard sheets (FE). At the upper and lower ends, the panel presents various closure solutions in relation to its function: in the case of structural walls, the subject of research, the closures are made from laminated wood boards equipped with couplings for the internal connection of the tubes, while also fulfilling the structural function of load sharing and connecting the panels to each other as well as to the foundation and roofing structures.

The hollow-resistant section can be filled with thermal and/or acoustic insulation material with

low environmental impact (cellulose fibre, expanded clay or wood fibre panels), to ensure the achievement of the thermo-hygrometric performance required by the legislation for energy efficiency. The final coating of the external surfaces is made with water-based paints that make it possible to increase the thermo-hygrometric properties of the material without altering the environmental impact. The entire system is designed to be completely disassembled at the end of its life cycle and recycled in all its parts.

PACOTEC™ panels have already been the subject of experimental campaigns to test their mechanical and physical performance, through:

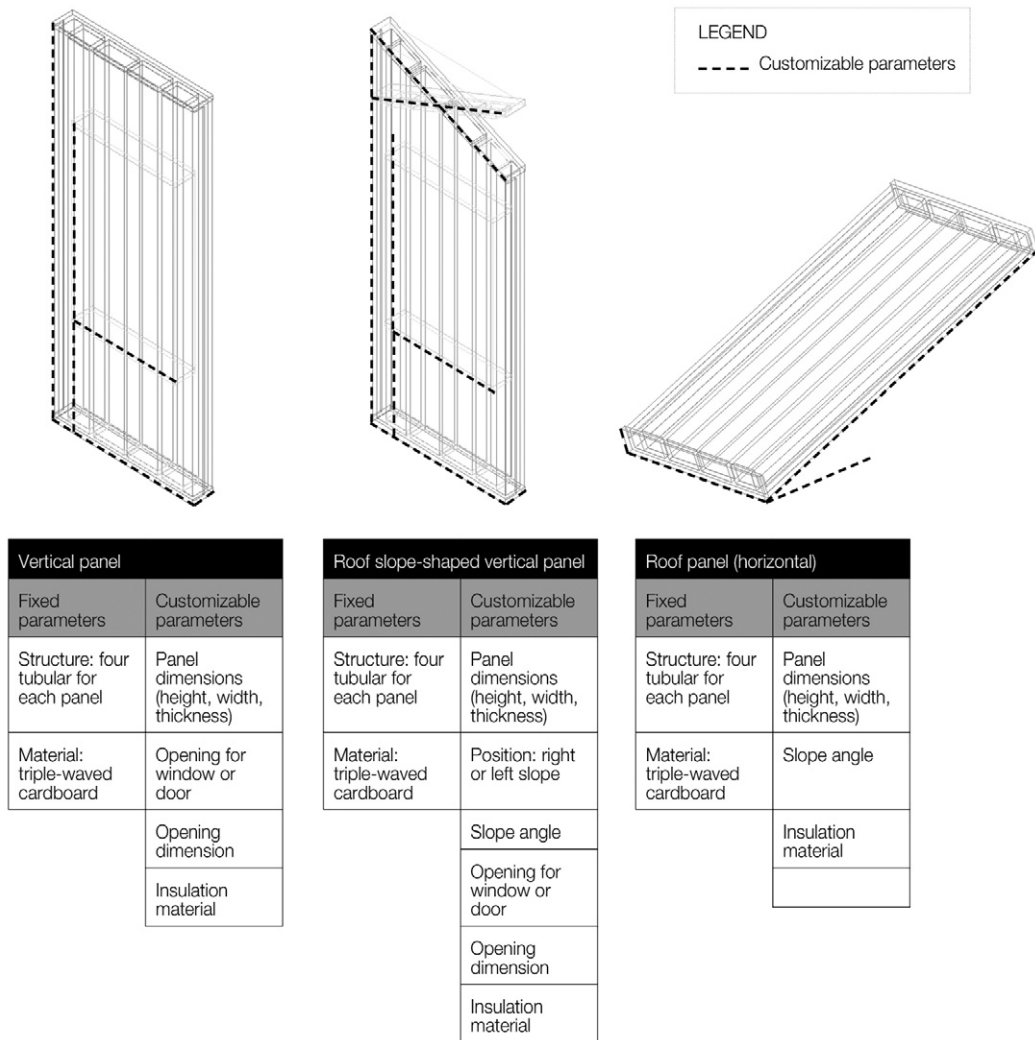


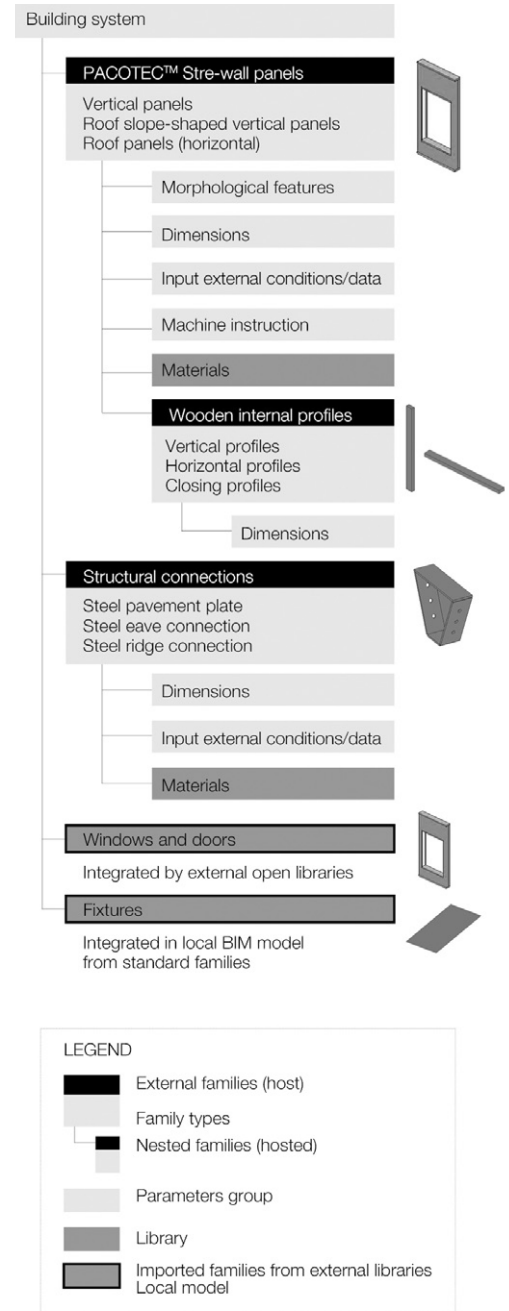
Fig. 8 | Identification of the invariants and customization options of the different types of prefabricated cardboard panels (credit: E. Belardi, 2021).

Fig. 9 | Structure of the data contained within the digitized model of prefabricated panels (credit: E. Belardi, 2021).

Next page

Fig. 10 | Parametric modelling of building system components in Autodesk® Revit: three-dimensional geometric model and example of the parameter variation dialogue window (credit: E. Belardi, 2021).

Fig. 11 | Graphic illustration of the optimization process of the pieces compared to the dimensions of the cardboard sheet, with the explanation of the calculation formula implemented in the software (credit: E. Belardi, 2021).



1) testing of centred compression load up to 7 tons, weight after which breakage due to local instability occurs; 2) testing and verification of thermo-hygrometric performance and durability in the external environment through the creation of a 25 square metres housing unit prototype (Fig. 2, 3) monitored for one year (from 2018 to 2019) at the Department of Civil Engineering and Architecture of the University of Catania (Fig. 4; Distefano, 2019) and in 2020 at the University of Corsica, Ecole d'Ingénieurs PAOLI-Tech (Fig. 5).

CARES Research | As previously mentioned, the general objective of CARES research was to develop a new scalable and replicable model of the production process of technological components made of corrugated cardboard, designed according to the demands of the selected industrial partner and in compliance with the paradigms of Industry 4.0, based on the use of BIM methodologies and the adoption of a file-to-factory and lean approach to production management (material procurement, design control and verification, man-

ufacturing and assembly) aimed at: (1) enhancing the computational capabilities of IT systems; (2) optimizing the use of raw materials and reduction of waste; (3) improving product quality control; (4) supporting mass customization of the system; and (5) increasing coordination between the different stages of the process.

Methodologically, the research development was carried out by narrowing the scope of investigation with respect to the production process of PACOTEC™ prefabricated panels, described in the previous section. Archicart® provided its technical expertise, instrumentation, and know-how to support the transfer and field implementation of the proposals developed in the theoretical-experimental phase.

The analysis of the design and production process of PACOTEC™ panels was carried out through the technical documentation made available by the company and through direct observation of the process within the production facility, with the aim of defining a flow chart (Fig. 6) that systemized the sequences, the actors, and the

tools involved in each phase of the process. In relation to this work-flow, the following critical elements requiring correction to optimize the production process from a 4.0 perspective were identified: 1) poor integration between the production phases and the tools used in the development of the sequences; 2) limited flexibility of the process to accommodate requests for product customization; 3) warehouse management not coordinated with production; 4) high manual interaction component for the processing of manufacturing input data (parts list and processing instructions); 5) high risk of production errors.

Based on the cognitive inputs, the second phase of the research involved the design of a new optimized and rationalized process model to manage the design and prefabrication activities of the building system (Fig. 7). Specifically, the proposed new work-flow was developed through product digitalization and process automation, structuring production sequences in a way that minimizes production waste (Lekan et alii, 2020). In detail, integration between the different stages

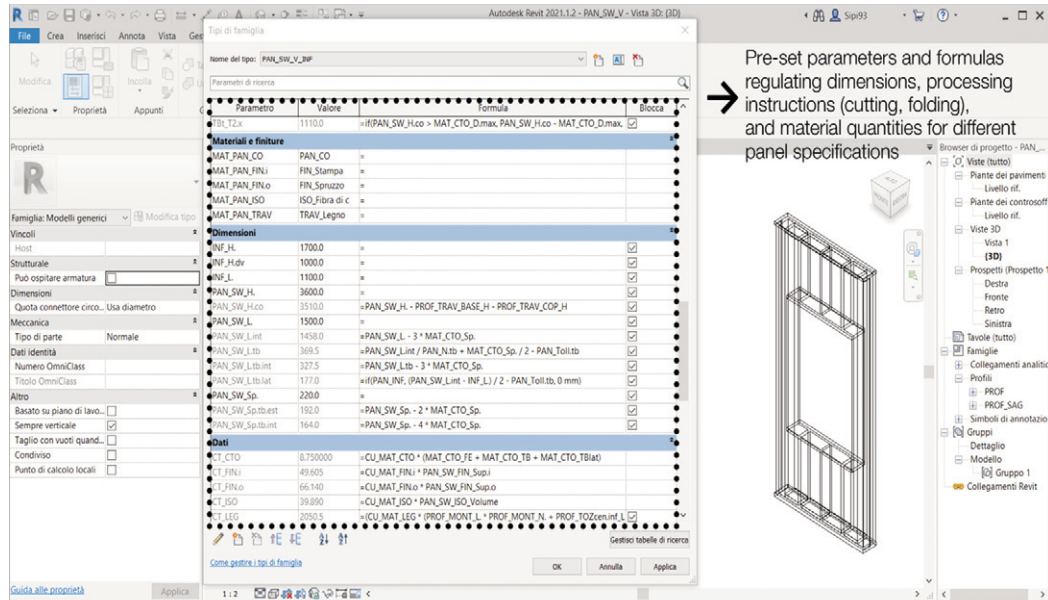
and actors involved in the process was achieved through the use of BIM modelling software, extending its functionality and testing its application to the rationalization of production variables as well, such as: 1) automated processing of the parts list for order management; 2) calculation of manufacturing instructions to be sent as input to processing machinery; 3) optimization of material procurement stages for project characteristics.

Finally, the research envisaged a phase of effective implementation within the company, through the application of the new organizational model and the digitalization of the PACOTEC™ production process, defined in its three basic types: vertical, shaped and horizontal. Initially, a discretization of the data characterizing the panel was made according to system invariant elements, dictated by technological and production constraints, as well as variable and customizable parameters (Fig. 8).

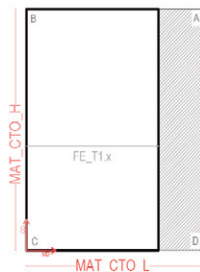
Subsequently, the parametric modelling of the main and secondary elements of the building system was developed through Autodesk® Revit BIM software, according to the data structure outlined in Figure 9 and with a level of data depth (LOD, UNI 11337-4:2017 standard) corresponding to LOD C: defined object; therefore, so-called 'families' were created, i.e., files with .rfa extension (Fig. 10) constituting a 'kit' of digital components that can be loaded, adapted, and exchanged between different digital devices. Embedded within the digital models are not only the parameters that regulate the options for morphological and dimensional customization of the panels and completion elements, but also algorithms that, based on the input data automatically operate a simplified nesting process, optimizing the number and size of the cardboard sheets with respect to the characteristics of the panels (Fig. 11).

Furthermore, automated calculation formulas for manufacturing instructions have been prepared within the digital models, in the form of a list of coordinates that are sent to the machines for processing through appropriate interchange files. Finally, the data processed by the model was collected in a series of pre-set abacuses within a software project template (file with .rte extension), used as a configurator within which to: 1) upload and customize digital models of the panels; 2) manage variables related to material ordering according to optimized dimensions; 3) send execution instructions to the machining tools.

Development of the test and verification phase through a case study | As previously mentioned, the methodology adopted for the test phase was based on the case study, verifying the validity of the optimization of the production process of PACOTEC™ panels through their use for the prototypical realization of a temporary school unit, made with load-bearing walls in prefabricated cardboard panels. The functional choice was motivated by the growing demand for accessory school spaces (reversible, lightweight and easily assembled) during the recent pandemic crisis. Based on the family files edited within the project template (Fig. 12) digital models of prefabricated corrugated board panels were customized and aggregated, thus exploring their design alternatives. This comparison led to the selection of the configuration represented in Figure 13, consid-



Fogli esterni
 I. $PAN_SW_H_{co} < MAT_CTO_D_{max}$ (valid for machine direction = MD, i.e. $D_{max} = MAT_CTO_H$)



I. $MAT_CTO_FE = 2 +$
 ↓
 Cardboard sheet quantity
 [number of sheets]

Progressive conditions ↓

II. $PAN_SW_H_{co} > MAT_CTO_D_{max}$ (per DIR = MD, $D_{max} = MAT_CTO_H$)

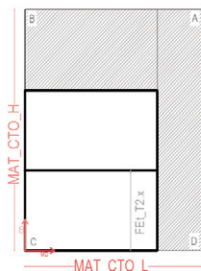


IIa. $FE_T1.x < MAT_CTO_D_{max}$: always verified condition
 $FE_T2.x < MAT_CTO_L - FE_T1.x$

IIa. $if((FE_T2.x < MAT_CTO_L - FE_T1.x), +0, II.b)$
 ↓
 Additional cardboard sheet quantity,
 to be added from condition I.

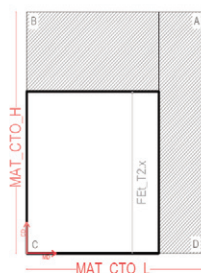
IIb. $FE_T2.x < (MAT_CTO_D_{max}/2)$

IIb. $if((FE_T2.x < MAT_CTO_D_{max}/2), +1, II.c)$
 ↓
 Additional cardboard sheet quantity,
 to be added from condition I.



IIc. $FE_T2.x > (MAT_CTO_D_{max}/2)$

IIc. $if((FE_T2.x > (MAT_CTO_D_{max}/2)), +2)$
 ↓
 Additional cardboard sheet quantity,
 to be added from condition I.



Final algorithm:

$MAT_CTO_FE = (if((FE_T2.x < MAT_CTO_D_{max} / 2, 1, 2)) + 2$

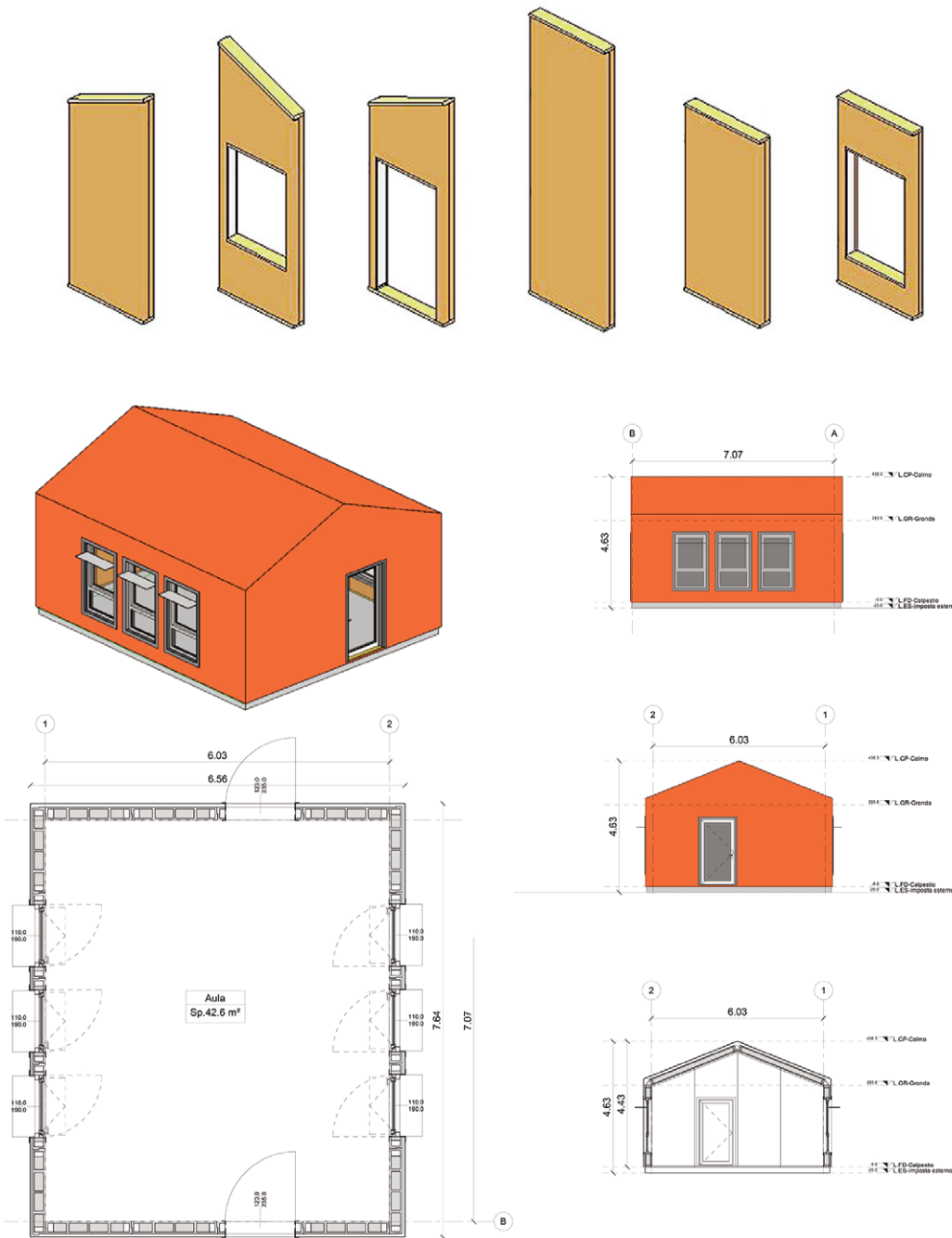


Fig. 12 | Customization of digitized panel models starting from a single information matrix (credit: E. Belardi, Archicart®, 2021).

Fig. 13 | Three-dimensional model, plan, prospectuses and section of the school unit configuration chosen for the implementation of the process model test and verification activities (credit: E. Belardi, Archicart®, 2021).

Combination	Dimensions		Joint height	Total cardboard quantity	Total cost	Saving Percentage of material
a	b [mm]		c [mm]	d [m ²]	e [€]	f
TB-01	2400	3100	2790	781.20	222.60	-
TB-02	1200	3100	2790	390.60	111.30	50.00%
TB-03	1200	3100	1500	522.66	148.93	33.10%
TB-04	1200	3100+2500	1500	489.18	139.39	37.38%
TB-05	1200	2800	2790	352.80	100.53	54.84%
TB-06	1200	2800	1500	472.08	134.52	39.57%

Tab. 1 | Combinations tested for the material consumption of the sheets required to produce the inner tubulars (TB) of the panel.

ered to be the most closely aligned with the initial requirements.

The BIM model enabled the automated extrapolation of all the data needed to manage the production of the school unit's components, namely: a) the parts list to be produced, i.e., the exact number and dimensions of the sheets of cardboard; b) the ordered list of input data needed to initiate processing, namely, a sequence of coordinates describing the path of the cutting and creasing tools.

The next phase concerned the analysis of the functionality of the BIM model for the potential reduction of material consumption. Operationally, the working methodology consisted in comparing six scenarios, corresponding to as many dimensional combinations of the cardboard sheets needed to produce the four tubulars present inside the panel, taking advantage of the automated calculation set within one of the calculation abacuses in the project model to progressively optimize raw material waste. The abacus functioning is activated, in fact, by entering the dimensions of the cardboard sheets in two open-ended fields, and by selecting the direction in which the sheets are inserted into the machine. Based on the inputs, pre-set algorithms within the abacus return the calculation of material consumption (area in square meters) and its cost, aggregating the parts to be produced within a sheet as large as the maximum available size.

The tested combinations (including the current one) were, therefore, obtained by gradually decreasing the sheet size and varying the height of the vertical separation joint, which is required for panels with heights greater than the maximum sheet size (Table 1). By comparing the various combinations, it was possible to observe that, in relation to the current production and warehouse management, the new CARES management model can achieve a reduction in total cardboard consumption of 54.84% (combination TB-05) compared to the starting point (combination TB-01).

Conclusions | CARES research results have shown how the adoption of management approaches and tools based on the principle of the double digitalization of product-process, achieves a generalized increase in the efficiency and environmental sustainability of the production process, optimizing material consumption and reducing production waste.

At the same time, the use of BIM platforms for the management of information flows makes it possible to aggregate the different phases and the various actors involved in the supply chain by

integrating the design and manufacturing phases of the components according to a file-to-factory approach with the management of the construction process; this results in a substantial reduction of manufacturing errors, increasing control over the quality of the final product and aligning the performance (technical-constructive, and related to energy and durability) verified during the design phase with that of the manufactured product. Additionally, the automation of production and assembly sequences requires the reduction of the interaction component between manual labour and machinery, with a consequent increase in safety for operators who are entrusted with the sole control and supervision of the process.

Finally, the new process model is automatically reconfigurable to accommodate product adaptability and customization requirements for mass customization. Morphological and dimensional changes on components, necessary to ensure the usability of the product in diverse contexts, are transposed by the instrumentations in an automated manner, without the need for manual re-

programming of the process and/or modification of its development sequences; this aligns the costs of custom production with those of mass production, overcoming the traditional limitations of building industrialization intended as mass production of standardized elements.

Compared with the state of the art, the study has formalised a scalable and replicable production process, based on the paradigm of digital transformation, which makes it possible to increase plant productivity and overcome the limitations traditionally associated with the experimental nature of the production of prefabricated corrugated cardboard products. The results are aimed at operators in the construction supply chain, envisioning the possibility of embarking on a digital transformation to streamline production, reduce the environmental burden of production, and support the resilience goals of the AEC industry to cope with the current resource crisis.

In the first phase of the research, the implementation of the process model involved only the digitalized management aspects related to the

design and manufacturing-assembly phases of the components; the next phases will concern the experimentation of the extension of BIM control to the management of the entire product lifecycle, from material procurement, through performance verification (structural, energy, LCA impact assessment), to the end-of-life phase and re-introduction of resources into other value chains.

At the same time, the next steps envisage the realization of the CARES prototype and its full-scale monitoring, in relation to the production and implementation phase, as well as the control of its energy and functional performance, with the hope that the construction of building systems made with corrugated cardboard components can overcome the experimental phase and be considered a new form of sustainable construction, capable of promoting the digital and ecological transition also advocated by international energy policies.

Acknowledgements

CARES research was developed under the collaboration and research agreement between the DIDA Department of Architecture (Heads: Prof. P. Gallo and Prof. R. Romano) and the Archicart® trademark of the company AREA Srl (Manager: Eng. D. Distefano) that led to the development of the PhD thesis in Architecture (XXXIV cycle) conducted by Dr E. Belardi entitled CARES Cardboard RElocatable School space (Tutor: Prof. P. Gallo and Prof. R. Romano) funded by MUR. The contribution is the result of the collaboration of all the authors; however, the introductory paragraph and ‘The use of corrugated cardboard in the construction industry’ have been edited by R. Romano (who coordinated the contribution), ‘The PACOTEC panels™’ by D. L. Distefano, ‘CARES research’ and ‘Development of the test and verification phase through a case study’ by E. Belardi and ‘Conclusions’ by P. Gallo.

Note

1) For more information on Wikkellhouse, consult the following webpage: fictionfactory.nl/en/wikkellhouse/ [Accessed 18 September 2022].

References

Abanda, F. H., Tah, J. H. M. and Cheung, F. K. T. (2017), “BIM in off-site manufacturing for buildings”, in *Journal of Building Engineering*, vol. 14, pp. 89-102. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobte.2017.10.002 [Accessed 18 September 2022].

Agarwal, B. R., Chandrasekaran, S. and Sridhar, M. (2016), *Imagining Construction's Digital Future*, Capital Projects and Infrastructure June 2016, McKinsey Productivity Sciences Center, Singapore. [Online] Available at: mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/imagining-constructions-digital-future# [Accessed 18 September 2022].

Ban, S. and Keio University SFC Ban Laboratory (2010), *Voluntary Architects Network – Making Architecture, Nurturing People – From Rwanda to Haiti*, Inax Publishing.

Clyde & Co (2018), *Embracing the Revolution – Legal and Industry Perspectives as Off-site Manufacturing Gains Traction*, Innovation in Construction Report. [Online]

Available at: clydeco.com/clyde/media/fileslibrary/Reports/PC_Off-site_Manufacturing_Report.pdf [Accessed 18 September 2022].

Distefano, D. L. (2019), *Precast Lightness – Cardboard Architecture Responds to Emergency – Design, Prototyping and Testing of a High Performance Emergency House-kit*, PhD Dissertation, DICAR, University of Catania. [Online] Available at: dspace.unict.it/handle/10761/4195 [Accessed 18 September 2022].

Du, Q., Bao, T., Li, Y., Huang, Y. and Shao, L. (2019), “Impact of prefabrication technology on the cradle-to-site CO₂ emissions of residential buildings”, in *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 21, issue 7, pp. 1499-1514. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10098-019-01723-y [Accessed 18 September 2022].

Ellen MacArthur Foundation (2013), *Towards the Circular Economy – Economic and business rationale for an accelerated transition*, vol. 1. [Online] Available at: emf.thirdlight.com/link/x8ay372a3r11-k6775n/@/preview/1?o [Accessed 18 September 2022].

European Commission (2019), *Horizon Europe – The Next EU Research & Innovation Investment Programme (2021-2027)*. [Online] Available at: ec.europa.eu/info/sites/default/files/research_and_innovation/strategy_on_research_and_innovation/presentations/horizon_europe_en_investing_to_shape_our_future.pdf [Accessed 08 October 2022].

European Parliament (2020), *Next Generation EU – A European instrument to counter the impact of the coronavirus pandemic*. [Online] Available at: [europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/652000/EPRS_BRI\(2020\)652000_EN.pdf](https://europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/652000/EPRS_BRI(2020)652000_EN.pdf) [Accessed 08 October 2022].

Galluccio, G. (2019), *Processi digitali avanzati per l'industria delle costruzioni 4.0 – BIM, digital manufacturing e prefabbricazione nell'edilizia in Cold-Formed Steel*, Aracne, Canterano.

Giglio, F. (2018), “Low Tech e materiali non convenzionali – Misura, Tempo, Luogo | Low Tech and unconventional materials. Measure, Time, Place”, in *Techné | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 16, pp. 122-130. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techné-22987 [Accessed 18 September 2022].

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 18 September 2022].

Guo, S., Zheng, S., Hu, Y., Hong, J., Wu, X. and Tang, M. (2019), “Embodied energy use in the global construction industry”, in *Applied Energy*, vol. 256, 113838, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113838 [Accessed 18 September 2022].

Gusmerotti, N. M., Frey, M. and Iraldo, F. (2020), *Management dell'economia circolare – Principi, drivers, modelli di business e misurazione*, FrancoAngeli, Milano.

Jodidio, P. (2015), *Shigeru Ban – Complete Works 1985-2015*, Taschen, Slovakia.

Latka, J. F. (2017), *Paper in architecture – Research by design, engineering and prototyping*, Architecture and the Built environment, n. 19. [Online] Available at: journals.open.tudelft.nl/abe/article/view/1875/2292 [Accessed 18 September 2022].

Lekan, A., Clinton, A., Fayomi, O. S. I. and James, O. (2020), “Lean thinking and industrial 4.0 approach to achieving construction 4.0 for industrialization and technological development”, in *Buildings*, vol. 10, issue 12, article 221, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings10120221 [Accessed 18 September 2022].

Ministero dello Sviluppo Economico (2021), *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza*. [Online] Available at: governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf [Accessed 08 October 2022].

Oesterreich, T. D. and Teuteberg, F. (2016), “Understanding the Implications of Digitisation and Automation in the Context of Industry 4.0 – A Triangulation Approach and Elements of a Research Agenda for the Construction Industry”, in *Computers in Industry*, vol. 83, pp. 121-139. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006 [Accessed 08 October 2022].

Wang, M., Wang, C. C., Sepasgozar, S. and Zlatanova, S. (2020), “A Systematic Review of Digital Technology Adoption in Off-Site Construction – Current Status and Future Direction towards Industry 4.0”, in *Buildings*, vol. 10, issue 11, article 204, pp. 1-29. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings10110204 [Accessed 08 October 2022].