



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Università degli Studi di Firenze
Dottorato in Architettura, Ciclo XXXIV

Elisa Belardi

CARES

Cardboard **R**elocatable **S**chool unit



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Dottorato in Architettura - Ciclo XXXIV

Coordinatore | Prof. Giuseppe De Luca

CARES. CARdboard RElocatable School unit
Digitalizzazione di prodotto-processo *BIM-based* per
la progettazione integrata e la produzione *smart* di pannelli prefabbricati in cartone
per la realizzazione di infrastrutture scolastiche di emergenza

Settore Scientifico Disciplinare (SSD) | ICAR/12

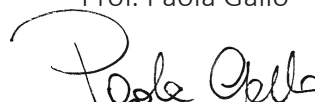
Candidata

Dott. Elisa Belardi


Firma

Tutor

Prof. Paola Gallo


Firma

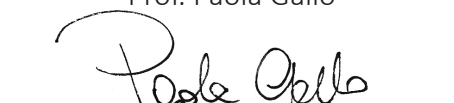
Co-tutor

Prof. Rosa Romano


Firma

Coordinatore

Prof. Paola Gallo


Firma

Anni 2018-2021

A Ginevra

Abstract

La ricerca **CARES** indaga il tema della digitalizzazione di prodotto e di processo nell'ambito della produzione industrializzata di componenti costruttivi prefabbricati in cartone ondulato, inquadrando la proposta nel contesto applicativo della realizzazione di manufatti scolastici temporanei.

Gli indirizzi della programmazione strategica comunitaria e nazionale (NEXT-EU, Horizon Europe, PEEC, PNRR) e l'affermazione di modelli di sviluppo basati sulla *green economy* prospettano per il comparto AEC la necessità di innovare le tecniche, gli approcci e i metodi di realizzazione delle opere per raggiungere obiettivi di qualità, sostenibilità e circolarità del ciclo di vita degli edifici. In questa prospettiva, la produzione edilizia *off-site* emerge come una modalità realizzativa che asseconda le esigenze di controllo, prevedibilità e razionalizzazione dei processi edilizi, spostando le sequenze realizzative dal cantiere all'ambiente controllato dell'officina. Contemporaneamente, i sistemi di produzione industrializzata stanno ridefinendosi in funzione delle innovazioni introdotte dalla Quarta Rivoluzione Industriale, una fase di trasformazione dei sistemi produttivi abilitata da una sempre maggiore penetrazione tra il mondo fisico e quello digitale. L'**Industria 4.0** rappresenta il paradigma di riferimento per le catene di produzione industriale, e prospetta l'affermazione di impianti altamente tecnologici ed efficienti, in cui i macchinari e gli strumenti di progetto sfruttano le capacità computazionali delle tecnologie digitali (Intel-

CARES research investigates the theme of product and process digitalization within the industrialized production of corrugated cardboard prefabricated building components, focusing the proposal in the applicative context of the realization of temporary school buildings.

European and Italian policies (NEXT-EU, Horizon Europe, PEEC, PNRR), as well as the establishment of green economy development models, require innovation in the techniques, approaches, and methods of construction to achieve improved quality, sustainability, and circularity of the life cycle of buildings. In this perspective, off-site building production emerges as a construction method that meets the needs of quality control, predictability, and rationalization of construction processes, shifting assembling sequences from on-site to the factory controlled environment. At the same time, industrialized production systems are being redefined according to the innovations introduced by the Fourth Industrial Revolution, a transformation phase of manufacturing systems enabled by the growing interpenetration of the physical and digital environments. **Industry 4.0** represents the paradigm for industrial production chains and foresees the affirmation of highly technological and efficient plants, in which machinery and design tools exploit the computational capabilities of digital technologies (Artificial Intelligence, IoT) to develop high-quality mass-customized products, optimize resources, reduce waste and emissions.

Together, the circular economy as a paradigm of eco-

ligenza Artificiale, IoT) per sviluppare prodotti con elevati standard qualitativi, adattabili secondo logiche di customizzazione di massa, ottimizzando le risorse utilizzate e riducendo la produzione di rifiuti e le emissioni.

Al tempo stesso, l'emergere della *circular economy* come paradigma dello sviluppo economico comunitario ha spinto la volontà di approfondire il campo di sperimentazione su materiali e tecnologie costruttive ad elevata eco-compatibilità e circolarità del ciclo di vita, che impiegano risorse da filiere di riciclo e riciclabili. Tale riflessione ha portato a circoscrivere il campo di indagine ad una tecnologia prefabbricata che utilizza il **cartone** come materiale costruttivo (pannelli **PACOTEC™ Stre-wall**), in quanto risorsa sostenibile, circolare e con ridotto impatto ambientale.

Mettendo a sistema tali input, la ricerca ha sviluppato, in collaborazione con il marchio Archicart® dell'azienda AREA S.r.l. (Catania) che produce la tecnologia **PACOTEC™ Stre-wall**, un percorso di industrializzazione nella produzione dei pannelli prefabbricati, definendo un nuovo modello di processo che fa propri i principi dell'Industria 4.0 per efficientare e razionalizzare il processo edilizio. La proposta è stata sviluppata assumendo come *test-bed* il contesto della realizzazione di interventi di edilizia scolastica emergenziale, ovvero manufatti temporanei per la gestione di condizioni ad elevata transitorietà come il post-disastro o l'attuale crisi sanitaria.

Il modello di processo è stato sviluppato a partire dall'integrazione dei principi della digitalizzazione e automazione nella progettazione e produzione *off-site* dei pannelli in cartone, adottando un approccio *file-to-factory* e *lean* alla gestione del processo edilizio. La fase propositiva ha previsto la digitalizzazione del sistema edilizio (pannelli prefabbricati ed elementi di completamento) attraverso la modellazione parametrica con un software di Building Information Modeling (BIM), estendendo l'applicazione dello strumento dalla sola gestione degli aspetti architettonico-costruttivi a quelli di fabbricazione e gestione della produzione. Il modello BIM dei pannelli contiene non

*conomic growth encouraged the further deepening of the research field on construction materials and technologies with high eco-compatibility and life-cycle circularity, particularly the ones that use resources from recycling and recyclable sources. From this reflection, the field of investigation has been narrowed down to a prefabricated technology that uses **cardboard** as a construction material (**PACOTEC™ Stre-wall** panels), i.e. a sustainable and circular resource with limited environmental impact.*

*Systemizing the framework, the research has developed, in collaboration with the Archicart® brand of the company AREA S.r.l. (Catania) that produces the technology **PACOTEC™ Stre-wall**, an industrialization process for the off-site manufacturing of cardboard panels. The output is a new process model that embraces the principles of Industry 4.0 to improve efficiency and rationalize the building process. The proposal has been developed assuming the realization of emergency school buildings as a test-bed, i.e. temporary structures for transitional conditions such as post-disaster or the current sanitary crisis.*

The process model has been developed starting from the integration of the principles of digitalization and automation in design and off-site production of cardboard panels, adopting a file-to-factory and lean approach to manage the building process. The proposal consists of the digitization of the building system (prefabricated panels and completion components) through parametric modeling with Building Information Modeling (BIM) software. The application of the BIM tool has been extended from architectural and constructional management to manufacturing operations and organization. In fact, panels' BIM model not only contains data for panels customization but it has been made able to calculate and manage automatically the executive instructions for manufacturing management, from material supply to processing and assembly.

The instructions are transferred directly to machinery, reducing the risk of errors and enabling a flexible reconfiguration of the assembly chain to mass-customize the

solo i dati che regolano la customizzazione delle caratteristiche morfologico-dimensionali dei componenti, ma è stato reso in grado di produrre e gestire automaticamente anche le informazioni propedeutiche alla gestione della produzione, dall'approvvigionamento dei materiali fino alla lavorazione dei pezzi. Tali istruzioni vengono trasferite direttamente ai macchinari di produzione, permettendo di ridurre il rischio di errori e abilitando la riconfigurazione flessibile della catena di assemblaggio in previsione della customizzazione di massa del prodotto edilizio. L'utilizzo degli strumenti proposti è stato testato nella prototipazione digitale dell'**unità scolastica CARES**, un modello innovativo di infrastruttura per l'educazione reversibile, riciclabile, customizzabile e adattabile al contesto di utilizzo. I risultati ottenuti consentono di osservare una ottimizzazione delle risorse utilizzate per la produzione dei componenti dell'unità scolastica (pannelli prefabbricati in cartone), riducendo il consumo di materiale e la produzione di rifiuti, indirizzando gli obiettivi di transizione ecologica e circolare di cui sono destinatarie le aziende del comparto AEC.

Il modello di processo elaborato risulta scalabile e ripetibile in altre realtà che operano nel settore privato della prefabbricazione industrializzata e che intendono avviare percorsi di specializzazione tecnologica e di digitalizzazione dei propri processi, strategie propedeutiche a garantire la resilienza dei sistemi di produzione nei confronti delle imminenti sfide ambientali.

Keywords

Modern Methods of Construction (MMC);
Architettura di cartone; Industria 4.0;
Digitalizzazione; Unità scolastica emergenziale

*building product. The use of the proposed tools has been tested in the digital prototyping of **CARES school unit**, an innovative model of education infrastructure that is reversible, recyclable, customizable, and adaptable to different contexts. The results show an optimization of the resources used for the production of the components of the school unit (prefabricated cardboard panels), reduced material consumption, and waste production. The research proposal allows addressing the European and national objectives of ecological and circular transition directed to the AEC sector.*

The process model is scalable and repeatable for other companies in the private sector of industrialized building production, that are interested in technological specialization and digitization of their processes as preparatory strategies to secure production and ensure resilience against the upcoming environmental challenges.

Keywords

*Modern Methods of Construction (MMC);
Cardboard architecture; Industry 4.0;
Digitalization; Emergency school unit*

Indice

Acronimi e abbreviazioni	1
Introduzione	5
I. Collocazione scientifica della ricerca.....	5
I.a. Aree Scientifico Disciplinari interessate dalla ricerca.....	5
I.b. Settori Scientifico Disciplinari interessati dalla ricerca.....	5
II. Base di partenza scientifica nazionale e internazionale.....	6
II.a. Stato dell'arte: quadro di riferimento e campo di indagine.....	6
II.b. Delimitazione del problema scientifico.....	8
III. Obiettivi generali e specifici della ricerca.....	8
IV. Metodologia, strumenti e attività di ricerca.....	9
IV.a. Fase istruttoria.....	10
IV.b. Fase di analisi.....	11
IV.c. Fase propositiva.....	12
IV.d. Fase di verifica.....	13
V. Risultati: rilevanza scientifica, innovazione e utilità della ricerca.....	13
VI. Destinatari privilegiati e spendibilità della ricerca.....	14
VII. Sviluppi futuri della ricerca, limiti e questioni aperte.....	15
PT.I Infrastrutture scolastiche di emergenza	18
1. Sfide e opportunità per il settore delle costruzioni	21
1.1. Le problematiche ambientali del comparto AEC: energia, emissioni, materiali.....	21
1.2. Fattori di inefficienza nella gestione dei processi edilizi.....	26
1.3. La produzione edilizia <i>off-site</i> : un'opportunità per garantire la qualità e l'efficienza dei processi edilizi.....	29
1.4. Economia circolare: nuovo paradigma dello sviluppo sostenibile.....	32
1.5. La digitalizzazione del processo edilizio come <i>driver</i> della transizione ecologica del settore delle costruzioni.....	42

2. Edilizia scolastica: un campo di prova per testare i paradigmi di innovazione del processo edilizio.....	49
2.1. Lo stato di fatto delle infrastrutture per l'educazione.....	49
2.2. Apprendere nell'emergenza: problematiche e questioni aperte.....	56
2.3. L'educazione scolastica nel diritto internazionale.....	60
2.4. Il ruolo dell'ambiente scolastico nel processo di apprendimento.....	63
2.5. Il ruolo sociale della scuola nei contesti post-disastro.....	67
2.6. La normativa italiana per la progettazione degli edifici scolastici.....	68
2.7. Emergenza, transitorietà e reversibilità nei modelli di abitare contemporaneo.....	70
2.8. Riletture del quadro esigenziale per l'architettura scolastica di emergenza.....	74
3. Lo stato dell'arte sulle infrastrutture educative di emergenza.....	77
3.1. Piani e programmi per l'infrastrutturazione scolastica.....	77
3.2. Ricerche e <i>best-practices</i> internazionali sulle architetture scolastiche di emergenza.....	89
3.3. Analisi di casi studio.....	95
3.4. Risultati: criticità e domande aperte.....	128
Conclusioni.....	131
PT.II Materiali, tecniche e metodi di produzione.....	132
1. Evoluzione storica delle tecniche di prefabbricazione.....	135
1.1. Premesse.....	135
1.2. Dalle origini della prefabbricazione alla produzione industrializzata.....	137
1.3. " <i>Better, faster, cheaper!</i> ": la produzione di massa negli Stati Uniti.....	141
1.4. Il Movimento Moderno in Europa.....	144
1.5. La prefabbricazione edilizia per la ricostruzione post-bellica.....	148
1.6. Verso l'industrializzazione flessibile.....	153
1.7. La corrente del Radicalismo e il movimento <i>high-tech</i>	157
1.8. La seconda metà del Ventesimo secolo.....	159
1.9. <i>Lesson learned</i>	160
2. I paradigmi contemporanei della produzione edilizia industrializzata.....	163
2.1. La Quarta Rivoluzione Industriale: tecnologie abilitanti per la digitalizzazione e automazione della produzione edilizia industrializzata.....	163
2.2. Construction 4.0: sostenibilità ambientale, fabbricazione <i>lean</i> e customizzazione di massa del prodotto edilizio.....	173
3. Tecnologie di prefabbricazione edilizia.....	179
3.1. Dalla classificazione tradizionale ai Modern Methods of Construction.....	179
3.2. Materiali, tecniche e metodi di produzione industrializzata.....	184
3.3. Il ruolo della normativa di settore: implicazioni all'approccio progettuale.....	191
4. Materiali innovativi a ridotto impatto ambientale: il cartone come materiale costruttivo.....	195
4.1. Perché il cartone?.....	195
4.2. Caratteristiche e prestazioni del cartone ondulato per gli usi edilizi.....	196

4.3. Sostenibilità e impatto ambientale del ciclo di vita del cartone.....	200
4.4. L'utilizzo del cartone come materiale costruttivo: esperienze, limiti e potenzialità.....	204
4.5. La tecnologia di pannelli prefabbricati PACOTECH TM Stre-wall.....	213
5. Analisi comparata delle performance della tecnologia rispetto ai MMC.....	221
5.1. Obiettivi dell'analisi.....	221
5.2. Metodologia e strumenti di indagine.....	222
5.3. Schede di lettura e raccolta dei dati.....	228
5.4. Risultati.....	254
5.5. Discussione.....	260
Conclusioni.....	264
PT.III Il progetto CARES.....	266
1. Digitalizzazione di prodotto-processo per la progettazione e produzione smart dei pannelli prefabbricati in cartone.....	269
1.1. Premesse, obiettivi di ricerca e metodologia.....	269
1.2. Analisi e formalizzazione dell'attuale processo di progettazione e produzione dei pannelli prefabbricati in cartone.....	272
1.3. Riprogettazione del processo secondo i paradigmi dell'Industria 4.0.....	275
1.4. Implementazione del processo in azienda.....	278
2. Test del processo sperimentale nella prototipazione digitale di una unità scolastica emergenziale: il progetto CARES.....	303
2.1. Un caso-studio per testare l'innovazione di prodotto-processo: proposta per un modello di unità scolastica emergenziale.....	303
2.2. Quadro esigenziale e strumenti di verifica BIM-based.....	306
2.3. Esplorazione delle alternative di progetto e progettazione dell'unità CARES.....	316
2.4. Ottimizzazione del consumo di materiale attraverso il modello BIM.....	326
2.5. Confronto e intervista con i destinatari del modello di processo sviluppato.....	330
3. Implicazioni scientifiche, limiti e sviluppi futuri della ricerca.....	335
Conclusioni.....	342
Bibliografia.....	345
Sitografia.....	371
Elenco delle appendici	371

Acronimi e abbreviazioni

AEC Architecture, Engineering and Construction

AI Artificial Intelligence

CAD Computer Aided Design

CAM Criteri Ambientali Minimi

CNC Computerized Numerica Control machines

BIM Building Information Modeling

BIMnd Building Information Modeling “n” dimension

BEM Building Energy Simulation

BPS Building Performance Simulation

GPP Green Public Procurement

IFC Industry Foundation Classes

IPP Integrated Product Policy

KETs Key Enabling Technologies

LCA Life Cycle Assessment/Analysis

LCC Life Cycle Cost

LOD Level of Development

LOI Level of Information

MMC Modern Methods of Construction

PA Pubbliche Amministrazioni

PAN GPP Piano di Azione Nazionale per il Green Public Procurement

PEEC Piano Europeo per l’Economia Circolare

PLC Programmable Logic Controller

PLM Product Life-cycle Management

PMI Piccole e Medie Imprese

PNRR Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza

Introduzione

Introduzione

I. Collocazione scientifica della ricerca

I.a. Aree Scientifico Disciplinari interessate dalla ricerca

La volontà di sviluppare una ricerca sul tema dell'Industria 4.0, inquadrato nel contesto applicativo dell'edilizia scolastica emergenziale, nasce dall'intenzione di approfondire l'impatto che le trasformazioni del digitale stanno avendo e avranno sulla gestione del prodotto e processo edilizio industrializzato. In particolare, si sono voluti indagare i potenziali di miglioramento dell'efficienza, qualità e sostenibilità dei processi di prefabbricazione edilizia, testando e trasferendo i contenuti di innovazione della ricerca al campo applicativo dell'edilizia pubblica scolastica di emergenza. La ricerca **CARES | CARdboard Relocatable School unit** si colloca all'interno dell'area scientifico-disciplinare dell'Ingegneria Civile e Architettura (Area 08), ovvero di quel settore di ricerca rivolto sia allo studio dell'oggetto architettonico, inteso quale insieme di componenti e sistemi, sia degli aspetti procedurali e metodologici che ne informano la realizzazione. La ricerca interseca anche alcuni contenuti dell'Area 09 – Ingegneria Industriale e dell'Informazione, in particolare negli aspetti che riguardano lo studio e l'approfondimento dei processi, dei metodi e delle tecniche di produzione *off-site* dei componenti costruttivi.

I.b. Settori Scientifico Disciplinari interessati dalla ricerca

I Settori Scientifico Disciplinari (SSD) interessati dalla ricerca sono:

- **ICAR/12 Tecnologia dell'Architettura** per ciò che riguarda l'indagine dei metodi e delle tecniche della produzione edilizia, in particolare quelle che prevedono la prefabbricazione fuori opera di componenti e/o parti degli edifici, nonché gli aspetti esigenziali-prestazionali connessi con la proposta di progetto di una unità scolastica emergenziale;
- **ING-IND/16 Tecnologie e sistemi di lavorazione**, negli aspetti che coinvolgono le tecniche e i metodi per la produzione industrializzata di componenti edilizi, nonché l'introduzione di tecnologie per la gestione digitalizzata del prodotto-processo di fabbricazione.

In particolare, la ricerca si propone di indagare gli effetti scaturiti dalla progressiva introduzione, nel settore della progettazione e della produzione *off-site*, di tecnologie basate sul digitale (cosiddette Key Enabling Technologies, KETs), che stanno ridefinendo le metodologie e gli approcci di riferimento del processo edilizio. I paradigmi di riferimento sono indagati rispetto alla loro capacità di indirizzare obiettivi di sostenibilità ambientale, razionalizzazione del consumo di risorse e riduzione della produzione di rifiuti, concetti che vengono analizzati in rapporto alla necessità di affermare modelli di *circular economy* e *green economy* richiamata dagli strumenti di programmazione comunitaria e nazionale.

II. Base di partenza scientifica nazionale e internazionale

II.a. Stato dell'arte: quadro di riferimento e campo di indagine

Negli ultimi anni, la rottura degli equilibri ecosistemici innescata dagli sconvolgimenti climatici ha portato a riflettere sulla necessità di rivedere i modelli di sviluppo economico globali. Il macro-obiettivo a cui guardano le *roadmap* di programmazione europea e nazionale (NEXT-EU, Horizon Europe, PEEC, PNRR) è quello del *decoupling*, ovvero di svincolare il progresso economico dallo sfruttamento intensivo delle risorse naturali. I modelli economici che supportano questo tipo di percorso sono quelli basati sulla **green economy** e la **circular economy**, ovvero sistemi che tendono alla riduzione dei rifiuti, alla valorizzazione delle risorse e alla rigenerazione dei sistemi naturali attraverso una più consapevole progettazione dei prodotti, processi e servizi e del loro ciclo di vita (*Life-cycle thinking*) (Gusmerotti *et al.*, 2020). Nel piano europeo di transizione ecologica e circolare, il settore AEC riveste un ruolo chiave, trattandosi di uno dei settori economici maggiormente impattanti sull'ambiente e che produce i più alti livelli di emissioni inquinanti e rifiuti. Tali criticità possono essere lette anche come conseguenza di un generalizzato stato di arretratezza che caratterizza le filiere di produzione edile, caratterizzate da una serie di fattori di inefficienza: indeterminata delle fasi realizzative delle opere in cantiere, frequenti aumenti dei tempi e dei costi di intervento, ricorso a varianti, limitato controllo sulla qualità finale delle costruzioni, scarsa coordinazione tra i diversi attori del processo (Guo *et al.*, 2019; IEA, 2013).

Come conseguenza degli obiettivi di efficientamento dei prodotti-processi edilizi che il comparto costruttivo è chiamato a indirizzare, emerge la necessità di ripensare le tecniche, metodi e approcci tradizionali con cui si gestiscono i processi edilizi, che risultano ormai obsoleti e inefficaci a gestire la crescente complessità delle opere (numero di operatori coinvolti, competenze, richieste di prestazioni). In questo scenario, l'adozione di tecniche di costruzione basate sulla prefabbricazione consente di allineare il processo realizzativo a standard altamente qualitativi, garantendo la prevedibilità del processo-prodotto edilizio, la riduzione dei tempi e dei costi di intervento, l'aumento della sicurezza per i lavoratori del settore. Nell'ultimo secolo, il tema della produzione edilizia industrializzata è stato affrontato interpretandolo come un mezzo di risposta sistematica alle crisi abitative post-belliche, rispondendo alla domanda "Se i processi di produzione industrializzata sono capaci di produrre altri beni e prodotti per la società, perché gli stessi processi non possono essere usati per produrre architetture con maggiore qualità e più accessibili?" (Smith, 2010, p. 3). Per tutto il Novecento, la produzione edilizia ha attinto a logiche di industrializzazione pesante, standardizzazione e produzione di massa, serialità e ripetitività delle soluzioni architettonico-costruttive come approccio operativo per esaurire la crescente domanda di infrastrutture. Tuttavia, a partire dalla seconda metà del secolo, tali approcci hanno dimostrato un'incapacità di assecondare le esigenze di personalizzazione e rappresentatività del progetto, contribuendo ad un progressivo abbandono delle tecniche di prefabbricazione in favore di metodi costruttivi tradizionali.

1. Trad. "If industrial-manufacturing processes can produce other products and goods for society, then why can't the same processes be harnessed to produce higher quality and more affordable architecture?" (Smith, 2010, p. 3)

Inquadrandolo il tema nell'ambito della **Quarta Rivoluzione Industriale**, attualmente in corso, emerge però la possibilità di dare una nuova interpretazione *sostenibile* per i sistemi di produzione edilizia. Le recenti innovazioni introdotte nel campo delle tecnologie digitali, lo sfruttamento dell'Intelligenza Artificiale (AI), unita alla disponibilità di macchinari ad elevata precisione (Computerized Numerical Control *machines* - CNC, *additive manufacturing*, taglio laser) hanno aperto la strada all'affermazione di modelli di Industria 4.0. Si tratta di ecosistemi produttivi altamente tecnologici ed efficienti, in cui la produzione avviene a fronte di un controllo stringente sulla qualità del prodotto finale, le sequenze di fabbricazione risultano flessibili e adattabili per abilitare la customizzazione di massa dei prodotti, e contemporaneamente ottimizzano le risorse per ridurre la produzione di rifiuti e di emissioni inquinanti. In questa prospettiva, la trasformazione dei modelli di produzione in sistemi di *smart factory* supporta l'affermazione di modelli economici circolari e *green*, consentendo di efficientare i processi edilizi (Kagermann *et al.*, 2011; Oesterreich e Teuteberg, 2016).

La ricerca ha inteso inquadrare e testare tali linee di sperimentazione nel campo di applicazione dell'**edilizia scolastica di emergenza** (contingenze post-disastro, indisponibilità degli edifici a seguito di interventi di riqualificazione, contesti ad elevata marginalità sociale e territoriale), un settore di intervento in cui si stanno aprendo molte possibilità per accogliere e scalare i contenuti di innovazione per il prodotto e processo edilizio. Le infrastrutture scolastiche mondiali manifestano infatti un profondo stato di vulnerabilità e inadeguatezza (ONU, 2015; Fondazione Agnelli, 2019;), e sono per questo destinatarie di numerose linee di finanziamento comunitario e nazionale che mirano a potenziare la qualità e quantità delle strutture per l'apprendimento, inserite rispettivamente nel quadro di Horizon Europe, Pillar II, Cluster "Culture, Creativity and Inclusive Society" e del PNRR, Missione 4: Istruzione e Ricerca, Componente 1 "Potenziamento dell'offerta dei servizi all'istruzione". Gli obiettivi nazionali di potenziamento dell'offerta infrastrutturale si sono inoltre rafforzati ulteriormente negli ultimi due anni in conseguenza della crisi sanitaria legata alla pandemia del virus Covid-19. La ripresa delle attività didattiche – avvenuta prima a Settembre 2020 e poi a Maggio 2021 –, ha infatti richiesto di mettere in atto una serie di interventi di adeguamento degli edifici scolastici, necessari a garantire il rispetto delle misure di sicurezza, che hanno a loro volta generato un ulteriore stato di emergenza legato alla mancanza di spazi in cui accogliere le attività. La volontà di inquadrare il tema nel contesto emergenziale deriva inoltre dal rintracciare interessanti corrispondenze con le intrinseche esigenze dell'abitare contemporaneo, che risultano sempre più improntate alla transitorietà delle condizioni di uso e alle esigenze di reversibilità, flessibilità e adattabilità dei sistemi costruiti.

Nel quadro di riferimento prospettato dalla programmazione e normativa comunitaria e nazionale, gli ambiti di interesse per la disciplina delle Tecnologie dell'Architettura riguardano l'approfondimento di quelle tecnologie costruttive, basate sulla prefabbricazione, e sistemi di produzione *smart* e digitalizzati che promuovono logiche di sostenibilità e incremento qualitativo dei prodotti e processi edilizi. Si tratta del campo di indagine dei cosiddetti Modern Methods of Construction (MMC), che comprendono sistemi costruttivi e metodi di produzione *off-site* ad elevato grado di integrazione digitale (AA.VV., 2019). Tale settore è stato indagato promuovendo al contempo un approfondimento rispetto ai materiali e tecnologie *low-tech* a spiccata reversibilità e circolarità del ciclo di vita, che assicurano la dismissibilità e ricollocabilità dei componenti costruttivi, oppure la possibilità di riciclo/rimanifattura. Seguendo tale linea interpretativa, il campo di indagine della ricerca è stato ulteriormente circoscritto all'indagine delle tecnologie costruttive basate sull'uso del cartone, il cui processo di produzione è stato analizzato rispetto alle tendenze di innovazione in atto nel contesto della Quarta Rivoluzione Industriale.

II.b. Delimitazione del problema scientifico

La ricerca indaga e approfondisce il processo di produzione di una tecnologia basata sull'uso del cartone ondulato come materiale costruttivo, con l'obiettivo di trasferirlo nella formulazione di una proposta di progetto per una unità scolastica emergenziale, improntata a principi di reversibilità, sostenibilità del ciclo di vita, circolarità ed elevata qualità architettonico-costruttiva. Nell'indagare le potenzialità del cartone come materiale costruttivo e la sua utilizzabilità nel campo dell'infrastrutturazione scolastica di emergenza, si sono approfonditi i potenziali prestazionali di una tecnologia basata su pannelli prefabbricati (**PACOTEC™ Stre-wall**) prodotta dall'azienda italiana AREA S.r.l. (Catania) che ha collaborato allo sviluppo della ricerca. Le caratteristiche di reversibilità, eco-compatibilità, circolarità, leggerezza e facilità di assemblaggio della tecnologia dimostrano infatti una corrispondenza con il quadro esigenziale richiesto per l'intervento emergenziale (Distefano, 2019). Tuttavia, analizzando il processo di produzione *off-site* della tecnologia rispetto ad altri MMC sviluppati in Europa, emerge come vi siano una serie di limiti nella gestione del prodotto-processo edilizio che ne limitano la competitività e l'applicabilità al campo di intervento individuato. In particolare, analizzando il processo di progettazione e produzione della tecnologia di pannelli prefabbricati in cartone, sono state messe in evidenza alcune problematiche, da cui sono state formulate le domande di ricerca, ovvero:

- **Orizzontalità del processo** e scarsa integrazione tra le fasi di progetto e produzione, con una conseguente elevata parcellizzazione delle informazioni e delle fasi di sviluppo del processo edilizio *off-site*; rischio di perdita di dati e/o di presenza di errori sul prodotto finale;
- **Difficoltà di controllo e coordinamento** delle fasi di produzione, per quanto riguarda l'approvvigionamento del materiale, la gestione degli ordini, la sistematizzazione delle distinte di materiale, la catalogazione e organizzazione dei pezzi durante le lavorazioni per tenere traccia dello stato di avanzamento;
- **Mancata ottimizzazione delle risorse** materiali, dal momento che il magazzino prevede il mantenimento di uno *stock* continuo di sotto-prodotti standardizzati, che non tengono conto delle dimensioni dei prodotti richiesti dai clienti, esponendo la produzione ad una elevata percentuale di scarti e rifiuti;
- **Limitato controllo sulla qualità** del prodotto finale, causata dalle lavorazioni prevalentemente manuali e da una elevata componente di interazione dei professionisti nello sviluppo delle specifiche esecutive (istruzioni per la fabbricazione);
- **Rigidità del sistema tecnologico e produttivo** nell'accogliere le esigenze di customizzazione del prodotto, poiché ciascuna modifica richiesta dalla committenza richiede la riconfigurazione e riprogettazione delle sequenze del processo di produzione, con un conseguente aumento di tempi e costi per la personalizzazione del progetto.

III. Obiettivi generali e specifici della ricerca

L'obiettivo generale della ricerca è quello di avviare un processo di industrializzazione nella produzione di pannelli prefabbricati in cartone ondulato, utilizzabile nel settore delle costruzioni come materiale edilizio, orientato a modelli Industria 4.0, attraverso l'integrazione dei paradigmi della digitalizzazione e automazione e adottando un approccio *file-to-factory* per la progettazione e produzione *off-site*. Lo scopo è quello di razionalizzare il processo edilizio in ottica di *lean manufacturing*, ottimizzandone le risorse coinvolte e sostenendo la circolarità e sostenibilità del suo ciclo di vita. Contemporaneamente, la ricerca intende testare tale modello di innovazione nel campo dell'edilizia scolastica emergenziale, nello specifico con l'obiettivo di sviluppare una proposta progettuale di unità scolastica ad elevata transitorietà, gestendone il processo di progettazione e produzione attraverso il sistema digitalizzato proposto.

La ricerca è stata dunque finalizzata a perseguire i seguenti obiettivi specifici:

- **Ottimizzazione delle risorse** e riduzione della produzione di rifiuti all'interno del processo edilizio di moduli temporanei realizzati con materiali ecocompatibili, attraverso la predisposizione di uno strumento digitalizzato che gli operatori possono utilizzare per razionalizzare i consumi di materiale sulla base delle richieste di produzione;
- **Aumento del controllo sulla qualità** del prodotto e sulla prevedibilità del processo, attraverso l'implementazione di un processo digitalizzato che coadiuvi la gestione del magazzino e degli ordini e abiliti il trasferimento diretto delle informazioni dalla fase di progetto a quella esecutiva di produzione di pannelli in cartone;
- **Incremento della flessibilità** e della riconfigurabilità del processo per garantire le possibilità di personalizzazione dei pannelli in cartone in ottica di customizzazione di massa;
- **Aumento della coordinazione** tra le diverse competenze, attori e informazioni coinvolti nel processo, dalle fasi di progettazione a quelle di fabbricazione *off-site* dei componenti dell'unità **CARES**;
- **Incremento della sicurezza** per i lavoratori durante le fasi di produzione dei pannelli dell'unità **CARES**, favorendo l'automazione del processo e la riduzione della componente di manodopera diretta;
- **Formulazione di una proposta progettuale** per un modello innovativo e sostenibile di unità scolastica emergenziale, realizzata in cartone, da sviluppare impiegando il nuovo modello di processo per la sua prototipazione digitale.

IV. Metodologia, strumenti e attività di ricerca

Il modello metodologico adottato dalla ricerca è di tipo induttivo con un approccio intersettoriale, e ha previsto la strutturazione delle attività secondo momenti di progressivo approfondimento. A partire dalla definizione del macro-tema, inquadrato nell'ambito dei sistemi di produzione edilizia *off-site* con un focus sulla loro applicazione all'infrastrutturazione scolastica di emergenza, sono state analizzate le tendenze di innovazione che afferiscono ai sistemi per l'Industria 4.0, applicate prima allo sviluppo di un modello di industrializzazione *smart* per la produzione di pannelli prefabbricati in cartone e successivamente alla proposta di un modello di unità scolastica da impiegare per la gestione di contingenze a carattere emergenziale, entrambi testati attraverso metodi di indagine quantitativi e qualitativi. Ogni fase di ricerca ha previsto l'adozione di una specifica metodologia e strumenti di indagine diretta e indiretta, approfondite in relazione alle diverse attività svolte. La metodologia generale adottata dalla ricerca è stata così strutturata:

1. Analisi del quadro di riferimento, attraverso un'indagine critica della letteratura scientifica e della normativa di settore, nazionale e internazionale, finalizzata alla raccolta di dati e informazioni inerenti all'inquadramento del tema e all'individuazione delle principali linee di ricerca e di indirizzo programmatico;
2. Analisi dello stato dell'arte, attraverso indagine bibliografica e siti specializzati, interviste con esperti del settore pubblico e privato, visite in stabilimenti produttivi, e partecipazione a convegni e workshop nazionali e internazionali;
3. Elaborazione di schede per la raccolta, sistematizzazione e comparazione di dati inerenti a casi-studio di edifici scolastici emergenziali e ai processi di realizzazione di tecnologie costruttive prefabbricate (MMC);
4. Sviluppo e implementazione di un modello di processo digitalizzato per la tecnologia di prefabbricazione in cartone **PACOTEC™ Stre-wall** (Archicart® di AREA S.r.l.), testato nell'applicazione al caso-studio del progetto di una unità scolastica emergenziale (**CARES**) per la Scuola Primaria "J. Piaget" di Altarello (Catania), fase sviluppata

attraverso un periodo di ricerca in azienda;

5. Verifica del modello di processo rispetto alla capacità di ottimizzazione del materiale e riduzione della produzione di rifiuti; confronto con gli operatori aziendali coinvolti nella ricerca, ovvero con gli attuatori del nuovo modello di processo, attraverso interviste dedicate.

IV.a. Fase istruttoria

La prima fase della ricerca ha previsto l'analisi del quadro di riferimento in cui si inserisce l'oggetto di ricerca, finalizzata a mettere a fuoco lo stato dell'arte e a individuare le direzioni di innovazione e le domande di ricerca aperte sul tema. In particolare, nella fase istruttoria sono state progressivamente approfondite le seguenti tematiche:

- Le normative e gli strumenti di programmazione, nazionali e comunitari, diretti al settore delle costruzioni, con particolare riferimento a quelli che interessano le opere pubbliche e la sostenibilità ambientale dei processi edilizi;
- I dati circa lo stato di fatto della filiera delle costruzioni, letti in rapporto alle linee di evoluzione stabilite a livello internazionale e nazionale;
- Lo stato di consistenza delle infrastrutture per l'educazione, in particolare quelle impiegate in contesti emergenziali, con l'obiettivo di inquadrare le tendenze di innovazione precedentemente individuate in uno specifico campo di sperimentazione;
- Le normative e linee guida di indirizzo alla progettazione di spazi educativi in Italia;
- Le ricerche nazionali e internazionali svolte sul tema di relazione tra qualità dello spazio scolastico e capacità di apprendimento degli alunni;
- Gli approcci culturali e filologici di riferimento per la progettazione di manufatti per l'emergenza nel contesto contemporaneo che, insieme agli input acquisiti in precedenza, analizzati criticamente e in maniera sistemica, hanno permesso di definire il quadro esigenziale di riferimento per l'intervento emergenziale scolastico;

Le ricerche, esempi e *best-practices* sviluppate sul tema emergenziale scolastico, in particolare indagandone gli aspetti tecnologico-produttivi relativi alla prefabbricazione attraverso schede sintetiche di confronto, che hanno avuto l'obiettivo di descrivere lo stato dell'arte e mettere a fuoco le domande di ricerca aperte.

La fase istruttoria ha previsto una metodologia di indagine diretta e indiretta, basata sulla raccolta di dati e informazioni attraverso una serie di fonti e attività, nello specifico:

- Analisi bibliografica della letteratura scientifica e dei riferimenti normativi;
- Interviste non strutturate con esperti e *stakeholders*, finalizzate a mettere a fuoco particolari problematiche di natura tecnico-operativa. In particolare, i contatti avuti in questa prima fase sono stati con il P.O. Immobili Scolastici e Interventi per la Sicurezza del Comune di Firenze e con il Servizio Lavori Pubblici, Patrimonio, Verde e Protezione Civile del Comune di Pistoia;
- Partecipazione a convegni, seminari e workshop sia in Italia che all'estero;

2. Ricerca "RI:SE. Riquilificazione Integrata degli edifici esistenti: Strutturale ed Energetica" (2018-2019).
Responsabile scientifico: Prof.ssa Paola Gallo,
Coordinatore Tecnico: Arch. PhD L. Boganini.

3. Ricerca "Verso gli Edifici a Zero Energy. Riquilificazione del patrimonio edilizio esistente: indirizzi e linee guida per le pubbliche amministrazioni" (2018-2019).
Responsabile scientifico: Prof.ssa Paola Gallo.

4. "Supporto alla redazione di un Capitolato per la Progettazione di Moduli Abitativi Temporanei Post-terremoto" in convenzione con il Consorzio della Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica ReLUIS e il Dipartimento di Protezione Civile (2019-2020),
Responsabile scientifico: Prof. Roberto Bologna.

- Partecipazione in ricerche nazionali sui temi della riqualificazione del patrimonio edilizio scolastico^{2,3}, e sulla predisposizione di un capitolato per la progettazione e programmazione strategica di unità abitative per l'emergenza post-terremoto⁴;
- Schedatura sintetica di casi-studio per la mappatura dello stato dell'arte degli interventi di edilizia scolastica emergenziale in Italia e all'estero.

IV.b. Fase di analisi

Il programma di ricerca ha previsto l'analisi dello stato dell'arte rispetto ai sistemi di produzione edilizia industrializzata e la loro applicazione al campo dell'edilizia scolastica emergenziale. In particolare, l'indagine ha previsto la raccolta ordinata di dati e informazioni inerenti:

- Le esperienze di ricerca e sperimentazione sviluppate sul tema delle architetture scolastiche emergenziali, attraverso la ricognizione e l'analisi critica di casi-studio e *best-practices* nel contesto nazionale e internazionale;
- La classificazione e le caratteristiche dei sistemi tecnologici ad elevato grado di prefabbricazione, con particolare riferimento a quelli che prevedono l'industrializzazione della produzione, ovvero circoscrivendo il campo al *framework* dei MMC;
- L'analisi storica delle tecnologie di prefabbricazione edilizia, approfondendo gli approcci e gli strumenti di riferimento nelle diverse fasi di evoluzione del tema, con l'obiettivo di individuare gli elementi di insuccesso e le attuali tendenze di innovazione e ricerca;
- L'analisi di tecnologie costruttive riciclabili e a ridotto impatto ambientale; in questo ambito, sono state approfondite le esperienze sviluppate sull'utilizzo del cartone come materiale costruttivo, indagando le caratteristiche prestazionali e di sostenibilità del materiale;
- L'analisi comparata delle caratteristiche prestazionali di una specifica tecnologia di prefabbricazione di pannelli in cartone (**PACOTEC™ Stre-wall**) rispetto ad altri 12 MMC sviluppati in Europa, con l'obiettivo di individuare i limiti e le direzioni di implementazione nella prospettiva di industrializzare il processo secondo i paradigmi dell'Industria 4.0
- La fase di analisi è stata sviluppata attraverso la predisposizione di schede sintetiche per la raccolta dei dati sulle caratteristiche e metodi di produzione dei sistemi costruttivi *off-site*, reperiti attraverso metodi diretti e indiretti e, nello specifico, ricorrendo ai seguenti strumenti:
 - Analisi bibliografica della letteratura scientifica e consultazione di siti specializzati;
 - Analisi di materiale tecnico inviato dalle aziende direttamente contattate e/o dagli studi di progettazione;
 - Interviste e contatti con ricercatori ed esperti, in occasione di visite negli stabilimenti produttivi, cantieri e attraverso la partecipazione a convegni e fiere del settore. In particolare, i contatti avuti in questa fase sono stati:

- Azienda Novello Case (Varese), che si occupa di prefabbricazione in legno;
- Azienda Archicart® AREA S.rl. (Catania), che sviluppa sistemi costruttivi prefabbricati in cartone;
- Azienda Algeco®, che si occupa di prefabbricazione modulare in acciaio;
- Azienda Modulcasa, che si occupa di prefabbricazione modulare in acciaio;
- Azienda Irondom (Avellino), che sviluppa sistemi di prefabbricazione in acciaio LSF;
- Azienda Gen7Schools (USA), che sviluppa sistemi di prefabbricazione modulare per l'edilizia scolastica;
- Studio di architettura Studioninedots (Olanda), per il progetto della scuola volano het4e Gymnasium;
- Centro di ricerca Lucense, anche sede del Centro Qualità Carta (Lucca), in quanto esperto di tematiche di ricerca inerenti all'utilizzo del cartone come materiale edile;
- Dr. Boris Ceranic dell'University of Derby (UK), responsabile del progetto SmartPod per lo sviluppo di un progetto di unità scolastica emergenziale innovativa a ridotto impatto ambientale.

IV.c. Fase propositiva

Le risultanze emerse dalle fasi di analisi hanno costituito l'input per l'elaborazione della fase propositiva della ricerca, che si è concentrata sullo sviluppo di un modello di processo industriale 4.0 per la gestione delle fasi di progettazione e produzione di pannelli prefabbricati in cartone ondulato. La fase propositiva ha avuto ad oggetto il caso-studio della tecnologia **PACOTEC™ Stre-wall** ed è stata elaborata con la collaborazione dell'azienda Archicart® AREA S.rl., in particolare nell'ambito di un Accordo di Collaborazione siglato dall'azienda con il Dipartimento DIDA dell'Università di Firenze. Le attività di collaborazione hanno previsto anche un periodo di permanenza di circa due mesi in azienda, finalizzato allo sviluppo e implementazione sul campo della proposta di ricerca. Il modello di processo è stato sviluppato e testato sulla base di un caso applicativo, ovvero la progettazione dell'unità scolastica emergenziale **CARES**, realizzata con pannelli prefabbricati in cartone, pensata come ampliamento della Scuola Primaria "J. Piaget" di Altarello (Catania). La fase propositiva è stata strutturata in una sequenza di fasi progressive, per ciascuna delle quali sono stati adottati specifici strumenti, ovvero:

1. **Formalizzazione dell'attuale workflow** del processo di progettazione e produzione dei pannelli prefabbricati in cartone;
2. **Riprogettazione del processo (workflow)** sulla base dei paradigmi di riferimento per l'Industria 4.0, e in particolare digitalizzazione del prodotto e automazione delle sequenze di produzione, secondo un approccio *file-to-factory*;
3. **Implementazione nel nuovo processo in azienda**, che è avvenuta a fronte di una serie di sotto-fasi di successivo sviluppo:
 - iv. Digitalizzazione dei pannelli prefabbricati con software BIM (Autodesk® Revit): ha richiesto l'individuazione delle invarianti e delle opzioni di customizzazione del sistema tecnologico (elementi *hard* e *soft* del sistema), la descrizione degli scenari di produzione e parametrizzazione dei dati dimensionali, materici, economici e di fabbricazione, ed infine la modellazione delle famiglie di oggetti digitali con l'inserimento dei parametri;
 - v. Creazione di un ambiente di configurazione, ovvero un "Modello di progetto" in Autodesk® Revit, e la predisposizione degli abachi per la raccolta dei parametri associati al progetto: distinta e computo dei materiali (*quantity take-off*), in particolare le dimensioni ottimizzate dei fogli di cartone; coordinate di lavorazione da trasferire in input al macchinario di taglio e cordonatura.

4. **Test dei nuovi strumenti BIM nella progettazione integrata di un modello di unità scolastica emergenziale**, che analogamente alla precedente ha previsto una serie di step intermedi di sviluppo: descrizione del quadro esigenziale, individuazione degli strumenti per l'integrazione del modello BIM con i software di simulazione per le successive verifiche prestazionali, concettualizzazione dell'idea progettuale, aggregazione dei pannelli digitalizzati all'interno del modello di progetto, e infine estrapolazione dei dati per la verifica dell'ottimizzazione raggiunta.

IV.d. Fase di verifica

La fase di verifica ha previsto due momenti distinti di acquisizione ed elaborazione dei dati. In primis, è stata prevista una comparazione sul quantitativo di materiale utilizzato dalla produzione nelle fasi pre e post-implementazione del modello di processo digitalizzato. La verifica ha previsto il calcolo della superficie di cartone necessario a produrre i componenti dell'unità scolastica **CARES**, valutato nel caso in cui si utilizzino fogli di cartone standard (2400 x 3100 mm), che vengono attualmente riforniti e stoccati in magazzino senza considerare la specificità della produzione, e nel caso di 12 combinazioni di progressiva ottimizzazione del numero e dimensioni dei fogli, elaborate utilizzando il modello digitalizzato in BIM. Tale operazione ha inteso verificare l'ottimizzazione del processo in relazione all'obiettivo di riduzione del consumo di materiale e della produzione di rifiuti. La comparazione è stata effettuata prendendo a riferimento il progetto dell'unità scolastica **CARES**, ovvero utilizzando il modello di progetto in cui erano stati precedentemente aggregati i pannelli. Successivamente, è stato previsto un momento di confronto finale con gli operatori aziendali, e nello specifico con gli utilizzatori e diretti attuatori del modello di processo proposto. Tale passaggio ha avuto lo scopo di acquisire una valutazione preliminare, nella forma di *feedback* qualitativo, rispetto all'efficientamento del processo in termini di coordinazione, capacità di controllo e organizzazione del progetto e produzione dei pannelli, flessibilità e adattabilità del prodotto finale.

V. Risultati: rilevanza scientifica, innovazione e utilità della ricerca

La proposta di ricerca si inserisce nel filone delle esperienze sviluppate sulle tematiche di innovazione prodotto-processo nel settore della produzione edilizia *off-site*, in particolare rispetto all'integrazione delle tecnologie abilitanti (KETs) – Intelligenza Artificiale (AI), tecniche di fabbricazione ad elevata precisione come taglio laser, manifattura additiva – che supportano la transizione digitale del comparto produttivo edilizio verso modelli *smart* di Industria 4.0. La strategia di digitalizzazione adottata dalla ricerca fa leva sull'approccio BIM, che oggi risulta come una delle metodologie più efficace a promuovere processi gestionali integrati, collaborativi, indispensabili a fronte della crescente complessità del progetto, utilizzandolo per riprogettare il processo edilizio di produzione industrializzata di una tecnologia costruttiva basata sull'uso del cartone. Gli strumenti implementati permettono di stabilire una linea diretta tra le fasi di ideazione e fabbricazione dei componenti, garantendo l'aderenza tra le prestazioni simulate e quelle concretamente ottenute dal prodotto edilizio. Il processo riprogettato risulta inoltre autonomamente riconfigurabile, perciò flessibile per accogliere la necessità di customizzazione dei prodotti, che può avvenire a fronte di minimi sovra-costi rispetto alla produzione in serie (customizzazione di massa). Sfruttando le capacità computazionali dei software è inoltre possibile operare, sia in fase di progetto che nell'organizzazione aziendale, una ottimizzazione delle risorse propedeutica a ridurre al minimo la produzione di rifiuti. Una possibilità che prospetta l'affermazione di modelli di sviluppo economico allineati ai principi della *green economy* e dell'economia circolare, che puntano alla valorizzazione delle risorse materiali all'interno delle filiere di produzione industriale.

Il modello di processo sviluppato in output dalla ricerca risulta inoltre scalabile e ripetibile anche ad altre realtà produttive, consentendo di testarne le prestazioni con riferimento alle diverse tecnologie di prefabbricazione attualmente disponibili sul mercato europeo. Quello della trasformazione in chiave digitale è infatti un percorso che richiama sempre maggiore interesse da parte delle aziende del comparto produttivo AEC, che sono alla ricerca di strumenti e strategie di digitalizzazione *smart* da implementare nelle logiche gestionali dei propri processi, per indirizzare gli obiettivi di transizione ecologica impostati dalla programmazione e normativa nazionale ed europea.

Nell'ambito della ricerca, tali innovazioni sono state sperimentate con riferimento ad una tecnologia costruttiva, basata sul cartone ondulato, che ha già intrinsecamente propri gli attributi di eco-compatibilità, sostenibilità e circolarità. Nel panorama delle ricerche sviluppate sul tema, l'originalità del contributo consiste nell'aver fornito un modello di processo utilizzabile per avviare l'industrializzazione della produzione di componenti edilizi in cartone, in grado di ottimizzarne e razionalizzarne il ciclo di vita. A questa proposta è stata affiancata quella di una potenziale applicazione, ovvero un modello innovativo di unità scolastica per usi emergenziali, reversibile, reimpiegabile, customizzabile e adattabile secondo le istanze del contesto in cui si inserisce, prodotta e sostenuta da un processo razionalizzato nell'uso delle risorse materiali lungo il ciclo di vita. Rispetto allo stato dell'arte dei modelli tecnologico-costruttivi e spaziali impiegati per la gestione delle emergenze scolastiche, tale proposta promuove un modello edilizio ad elevato valore sociale e ambientale, che integra le considerazioni sul rapporto tra qualità dello spazio scolastico e apprendimento e, contemporaneamente, risponde ai requisiti ambientali richiesti dalle normative nazionali per l'edilizia pubblica (CAM).

VI. Destinatari privilegiati e spendibilità della ricerca

I principali destinatari a cui si rivolge la proposta di ricerca sono:

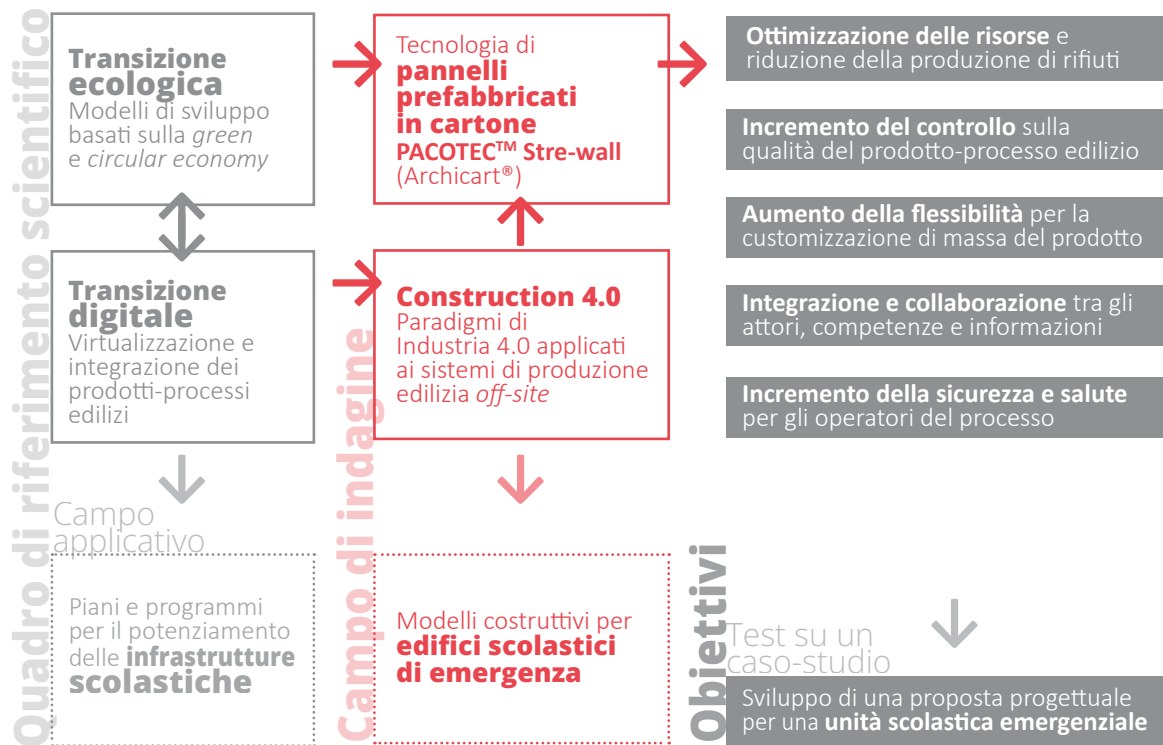
- Per quanto riguarda il modello di processo, gli **operatori del settore privato**, in particolare le aziende che operano nella produzione edilizia industrializzata di sistemi costruttivi *off-site* e che intendono avviare percorsi di specializzazione tecnologica e digitalizzazione dei propri processi, poiché possono acquisire e implementare il modello proposto, riadattandolo alle specifiche operative richieste per la propria produzione;
- Per quanto attiene agli strumenti messi a punto dell'ambito della ricerca (modelli digitalizzati del prodotto, ambiente per la configurazione e gestione del progetto), questi possono essere destinati, oltre che alle **aree di sviluppo tecnico all'interno delle aziende**, anche a **progettisti e consulenti esterni** coinvolti nella progettazione delle opere, che li potranno utilizzare, anche mettendoli a disposizione *open-source*, alle diverse scale di sviluppo dei propri progetti per migliorare la comunicazione con i committenti (*co-design*) e successivamente con le aziende incaricate della produzione, al fine di operare una connessione diretta tra i diversi ambiti di implementazione delle opere;
- Rispetto al modello di unità scolastica **CARES**, questo è da destinare ai decisori delle **amministrazioni pubbliche** (Comuni, Province, Protezione Civile) come soluzione alle problematiche connesse con la mancanza di spazi didattici, ovvero per la rapida realizzazione di interventi di edilizia scolastica di breve-medio termine in diversi contesti: aree di infrastrutturazione post-disastro, emergenze sanitarie, ampliamenti temporanei degli istituti scolastici, contesti urbani o rurali ad elevata marginalità da riqualificare attraverso di nuove funzioni puntuali legate all'educazione (biblioteche, spazi per attività ludico-culturali, ecc.).

VII. Sviluppi futuri della ricerca, limiti e questioni aperte

I principali limiti incontrati durante lo svolgimento della ricerca si sono rivelati di natura tecnico-operativa. In particolare, una prima difficoltà si è riscontrata nell'integrazione tra gli strumenti BIM, impiegati per l'aggregazione e progettazione del caso-studio dell'unità scolastica, e quelli di simulazione delle prestazioni energetico-ambientali e strutturali. Un tema, quello della relazione tra BIM e Building Performance Simulation (BPS) che ancora non ha raggiunto una piena maturità negli ambiti di ricerca scientifica e di sviluppo tecnologico, rispetto al quale la proposta di ricerca si è limitata all'individuazione degli strumenti che favoriscono una maggiore interoperabilità tra i due aspetti. Per quanto riguarda l'implementazione del processo in azienda, questo è stato adottato per un tempo non sufficientemente prolungato affinché si potessero acquisire i dati necessari a misurare, sul lungo periodo, il livello di innovazione introdotto. Per questo motivo si ritiene opportuno, una volta completata l'adozione del *workflow* per le diverse tipologie di componenti prodotti dall'azienda, continuare a monitorare e acquisire dati (almeno 12 mesi) sulla base di opportuni indicatori quantitativi che potranno essere successivamente comparati con la fase di pre-implementazione, per esempio il fabbisogno energetico, i tempi e costi di produzione, il consumo di materiale, ecc. Dal punto di vista qualitativo, i margini di efficacia del nuovo processo potranno essere invece valutati applicando gli stessi principi e strumenti ad altre realtà produttive, una fase che potrà essere attivata attraverso la ricerca di realtà imprenditoriali interessate a portare avanti percorsi di specializzazione tecnologica attraverso l'introduzione del BIM dei propri processi. Le domande di ricerca rimaste aperte potranno dunque essere affrontate attraverso una serie di approfondimenti e azioni successive nella fase di post-doc. In particolare, le linee di ricerca che si intende portare avanti in futuro sono:

- Sviluppare, a partire dal modello digitalizzato dell'unità **CARES** e con il coinvolgimento di esperti, l'interconnessione tra gli strumenti BIM e quelli di simulazione energetica, strutturale, acustica e di calcolo dell'impatto LCA/LCC della tecnologia;
- Acquisire e comparare gli indicatori quantitativi per la misurazione del livello di ottimizzazione raggiunto dal processo, mettendo a confronto le fasi pre e post implementazione del sistema digitalizzato;
- Acquisire e comparare, dopo aver scalato il modello ad altre tecnologie di prefabbricazione, gli indicatori qualitativi per valutare il grado di soddisfazione da parte degli operatori in termini di coordinazione, capacità di controllo e organizzazione, sicurezza;
- Correggere e ottimizzare progressivamente il modello sulla base dei dati acquisiti e attraverso la produzione di una serie di prototipi di pannello, da realizzare attraverso la nuova strumentazione;
- Installare e monitorare un primo prototipo di unità scolastica, con l'obiettivo di valutarne le prestazioni in uso;
- Trasferire il sistema digitalizzato in un applicativo maggiormente *user-friendly*, collegato a librerie *open-source*, che permetta di aggregare, personalizzare, simulare e verificare le prestazioni, comunicando direttamente con le strumentazioni all'interno della fabbrica per gestire autonomamente la produzione e l'organizzazione delle sequenze;
- Valutare la possibilità di estendere i concetti di digitalizzazione alla gestione dell'intero ciclo di vita dei manufatti, in particolare approfondendo le tematiche dell'Industria 4.0 e del BIM rispettivamente per le fasi di cantierizzazione e gestione-manutenzione-fine vita dei manufatti.

INQUADRAMENTO

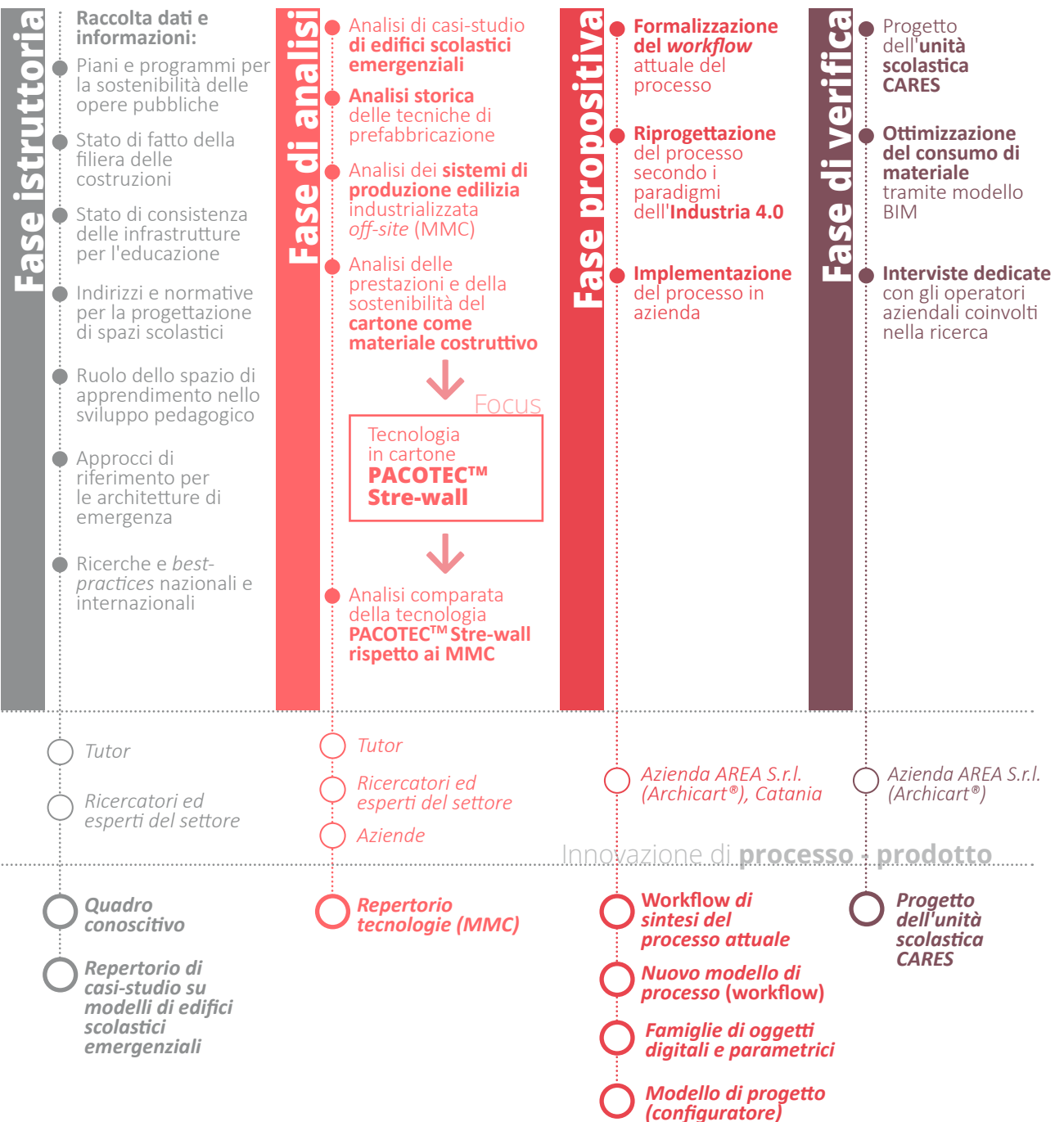


INTERLOCUTORI

OUTPUT

Sintesi della ricerca

METODOLOGIA



*Intervenire in emergenza
è sempre una sconfitta.*

Manenti e Coccagna, 2012

pt.l

Emergenza



Fig.X- Inserire didascalìa
immagine accanto
(Credits: Inserire rifer.)

I.1 Sfide e opportunità per il settore delle costruzioni

1.1. Le problematiche ambientali del comparto AEC: energia, emissioni, materiali

Il settore Architecture, Engineering and Construction (AEC) si confronta attualmente con una serie di sfide che riguardano la sostenibilità, la qualità e l'efficienza dei prodotti e dei processi edilizi. Le più recenti ricerche di settore prospettano un quadro di numerose problematiche, di carattere ambientale e socio-economico, che gravano sull'intera filiera delle costruzioni, rallentandone la tabella di marcia verso obiettivi di sostenibilità e competitività rispetto agli altri settori produttivi (Cuadrado *et al.*, 2016). Una delle problematiche di maggiore urgenza è quella legata alla questione ambientale, ovvero l'impatto che le attività costruttive generano sugli ecosistemi naturali. A partire dalla seconda metà del Novecento, il progresso tecnologico, unito ad una ampia disponibilità di combustibili fossili a basso costo, ha generato profondi cambiamenti negli assetti sociali, culturali ed economici tradizionali. Soprattutto nei paesi occidentali, tali condizioni hanno favorito la ricerca, da parte dell'uomo, di uno stato di benessere crescente; un'evoluzione che è avvenuta però a fronte di uno sfruttamento intensivo delle risorse naturali, funzionale ad assecondare standard di vita progressivamente sempre più elevati. Decenni dopo il suo inizio, questo processo di espansione economica ha assunto proporzioni tali da diventare pressoché incompatibile con la permanenza stessa dell'uomo sulla Terra. L'Earth Overshoot Day è la data convenzionale in cui gli esperti fanno cadere il giorno in cui il fabbisogno di risorse richiesto dall'uomo supera il quantitativo rigenerabile dal nostro pianeta nell'arco di un anno. Per capire la portata dell'impatto delle attività umane, è sufficiente osservare che nel 1970 tale data cadeva al 30 dicembre, mentre nel 2021 si è sposata al 29 luglio (EOD, 2021) (Fig.2). Al ritmo di consumo attuale, si prospetta uno scenario in cui al 2050 saranno necessarie risorse equivalenti a tre pianeti per soddisfare le esigenze della popolazione globale, con un incremento della produzione annua di rifiuti del 70% (EOD, 2021). Lo sfruttamento incontrollato delle risorse, il consumismo di massa, l'aumento smisurato dei rifiuti, hanno inciso sugli ecosistemi globali a tal punto da proiettare la Terra in una nuova era geologica, l'Antropocene¹, in cui "l'ambiente terrestre, nell'insieme delle sue caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche, viene fortemente condizionato su scala sia locale sia globale dagli effetti dell'azione umana" (Treccani, 2016). Al contrario delle precedenti, in cui i cambiamenti sono avvenuti nel corso di secoli, gli effetti dell'Antropocene si sono drammaticamente manifestati in tempi brevissimi, con conseguenze spesso irreversibili:

- Perdita di biodiversità ed estinzione forzata di specie animali e vegetali;
- Incremento dei consumi energetici, in particolar modo nei paesi occidentali, nei quali si stima un consumo di 10-20 volte superiore rispetto ai paesi in via di sviluppo;
- Aumento della produzione di energia da combustibili fossili e crescita esponenziale della produzione di gas climalteranti – fino a +160 parti per milione rispetto ai livelli pre-industriali –, con un ritmo di crescita che non ha

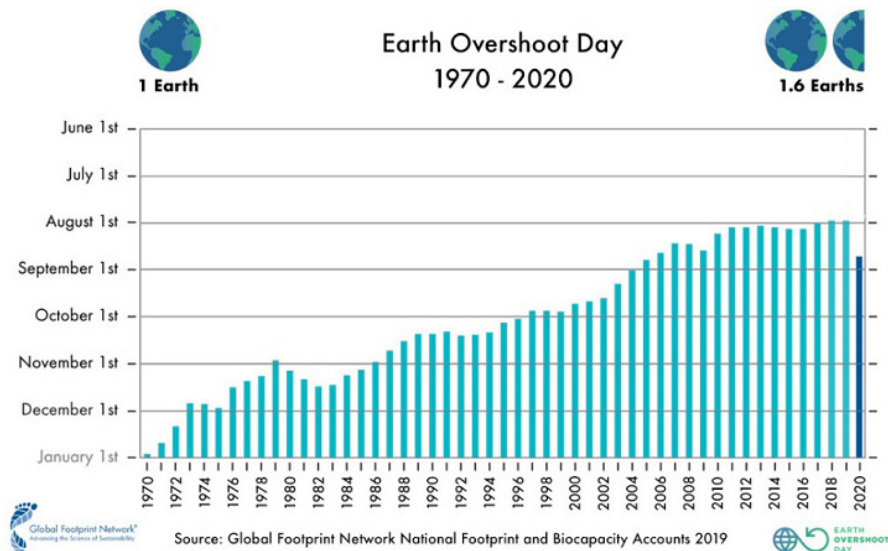


Fig.1 (prima pagina) -
 Miniere di potassio nei
 Monti Urali in Russia; foto
 della mostra Anthropocene
 allestita nel 2019 al MAST di
 Bologna (Credits: © Edward
 Burtynsky, 2017 da www.
 ilsole24ore.com)

Fig.2 - Spostamento progres-
 sivo del Earth Overshoot
 Day dal 1970 al 2020
 (Credits: Global Footprint
 Network National Footprint
 and Biocapacity Account
 2019)

precedenti nelle altre ere;

- Surriscaldamento globale e incremento incontrollato della frequenza e della magnitu-
 do di fenomeni naturali catastrofici come incendi, alluvioni, tsunami, ondate di calore
 (Coronese *et al.*, 2019; Davidson, 2019).

A partire dagli ultimi decenni del Novecento, l’osservazione diretta delle gravissime conse-
 guenze ambientali provocate dai precedenti modelli di sviluppo, ha portato alla diffusione
 di una nuova coscienza ambientale in tutti i settori politici ed economici, evidenziando la
 necessità di dover ristabilire la compatibilità tra la sopravvivenza degli ecosistemi naturali
 e di quelli antropici. Le politiche di programmazione internazionale hanno quindi messo in
 campo una serie di azioni volte ad affermare modelli di sviluppo sostenibili, in grado di assi-
 curare la crescita economica e l’uguaglianza di opportunità pur preservando l’integrità dei
 sistemi naturali e l’accessibilità delle risorse da parte delle generazioni future.

Il macro-obiettivo a cui tendere è indubbiamente quello della riduzione delle emis-
 sioni inquinanti. L’impegno formale in questa direzione è stato sottoscritto nel dicembre
 2015 con l’**Accordo di Parigi**, siglato nell’ambito della Conferenza delle Parti della Con-
 venzione sui cambiamenti climatici (COP21). Si tratta del primo accordo universale e giuridi-
 camente vincolante sui cambiamenti climatici, con il quale 195 stati firmatari, 55 dei quali
 rappresentavano almeno il 55% delle emissioni globali, si sono impegnati ad intraprendere
 un percorso di lotta ai cambiamenti climatici attraverso piani nazionali di azione per il clima.
 Nello specifico, il target impostato è quello di contenere l’innalzamento della temperatura
 entro i 1.5°C rispetto ai livelli pre-industriali, da raggiungere riducendo la produzione di gas
 climalteranti e ristabilendo un equilibrio tra le emissioni e la capacità di assorbimento del
 pianeta.

Obiettivi analoghi a quelli della Conferenza COP21 sono quelli contenuti nel quadro dei **Su-
 sustainable Development Goals (SDGs) dell’Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile** (Fig.3),
 un programma di azioni per la sostenibilità siglato nel 2015 dai governi di 193 Paesi membri
 dell’ONU. L’Agenda 2030 individua nei suoi 17 Obiettivi un insieme di obiettivi strategici per

1. Seppure sia ancora
 oggetto di discussione da
 parte degli esperti, il pas-
 saggio formale dall’Olocene
 all’Antropocene, da datare
 convenzionalmente al 1950,
 è stato discusso e proposto
 da un gruppo di scienziati
 internazionali nell’ambito di
 una Conferenza dell’Internat-
 ional Geological Congress
 tenutasi nel 2016 Cape Town
 (South Africa).





Fig.3 - Quadro dei Sustainable Development Goals (SSG) (Credits: ONU, 2015)

guidare lo sviluppo socio-economico dei prossimi 15 anni, armonizzando la crescita economica, l'inclusione sociale e la tutela dell'ambiente. L'azione sul clima è contenuta specificatamente nel "Goal 12: Responsible consumption and production", che richiama l'attenzione sulle conseguenze ambientali delle azioni umane sul pianeta. Operativamente, gli obiettivi fissati sono quelli della gestione sostenibile dell'energia, dell'uso efficiente delle risorse naturali e della riduzione della produzione di rifiuti, che si intendono perseguire svincolando il progresso delle nazioni da modelli di consumo intensivo in favore di pratiche virtuose di riuso, riutilizzo e riciclo delle risorse (ONU, 2015).



Recentemente, anche la Commissione Europea ha potenziato la propria politica di transizione verso la neutralità climatica nell'ambito del **Green Deal europeo** (2020), un pacchetto di iniziative multi-settoriali che intendono rendere l'Europa il primo continente climaticamente neutro entro il 2050. Il Green Deal rappresenta un patto di intenti per una crescita sostenibile dell'Unione Europea, e mira infatti a obiettivi di azzeramento delle emissioni, rafforzamento della competitività dell'Unione, dissociazione del progresso economico dallo sfruttamento intensivo delle risorse e conversione a modelli di sviluppo basati sul paradigma della *green economy* (Commissione Europea, 2019a). Il patto rappresenta la colonna portante della programmazione pluriennale europea per guidare la transizione ecologica, e stabilisce le tappe del percorso di decarbonizzazione di tutti i settori produttivi. In particolare, la proposta al 2030 è quella di:

- Ridurre del 40% le emissioni di gas a effetto serra rispetto al 1990;
- Migliorare l'efficienza energetica dell'Unione, diminuendo il fabbisogno di energia del 32.5%;
- Incrementare l'approvvigionamento da fonti rinnovabili, arrivando ad una copertura di almeno il 32% del fabbisogno energetico.

In questo quadro di programmazione, il **settore delle costruzioni** riveste un ruolo di prioritaria importanza, essendo uno dei settori produttivi con il maggior impatto sull'ambiente. Negli ultimi decenni, la crescita demografica e la rapida urbanizzazione di molte aree

del pianeta hanno provocato un'espansione massiva del settore edile, accrescendo la domanda di nuove costruzioni e facendo aumentare significativamente i consumi energetici i potenziali di impatto ambientale di tutto il comparto AEC. Attualmente, si stima che al settore delle costruzioni sia imputabile il 16% del consumo globale di acqua e più del 90% della perdita di biodiversità mondiale (Dixit *et al.*, 2010). Per quanto riguarda la questione energetica, un recente rapporto dell'International Energy Agency (IEA) afferma che le costruzioni sono responsabili dei più alti livelli di consumo energetico tra tutti i settori economici; considerando anche la manifattura edile (lavorazione di materiali, produzione di componenti per l'edilizia), all'intero comparto è imputabile il 39% del fabbisogno globale di energia (Fig.4) e il 36% delle emissioni mondiali di CO₂ (11 Gt nel 2018) (IEA, 2013; Guo *et al.*, 2019). Inoltre, nell'ultimo decennio il consumo energetico degli edifici, nonché il quantitativo di emissioni prodotte, hanno subito una crescita esponenziale, con un tasso di incremento secondo solo al settore dei trasporti (Clyde&Co, 2016; Ciancio *et al.*, 2020). È significativo che solo tra il 2017 e il 2018, il fabbisogno energetico degli edifici ha registrato un aumento del 2%, e attualmente si calcolano un incremento totale di circa 8 EJ (+7%) di energia consumata rispetto al 2010 (IEA, 2019). La situazione globale si riflette anche nelle statistiche nazionali; in Italia, il periodo 2001-2015 ha visto un aumento stabile dei consumi energetici del settore edilizio, con un conseguente incremento progressivo del quantitativo di sostanze inquinanti immesse in atmosfera (ISPRA, 2017).

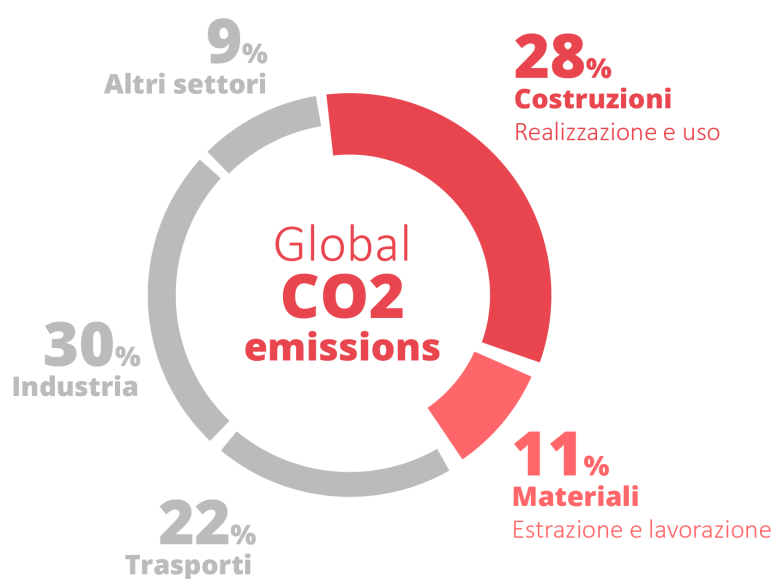


Fig.4 - Produzione globale di CO₂ suddivisa tra i principali settori produttivi: al comparto edilizio è imputabile complessivamente il 39% delle emissioni (Credits: Elaborazione personale dai dati, 2021)

La problematica energetica che coinvolge le costruzioni è riconducibile a due principali fattori: la scarsa qualità del sistema costruito e la gestione inefficiente delle risorse all'interno del processo edilizio. Nel primo caso, si deve considerare che, dalla seconda metà del Novecento, la crescita demografica ha provocato un'espansione massiva degli insediamenti urbani; negli ultimi dieci anni, la superficie coperta dagli edifici è aumentata del 23%, e l'aumento della domanda per la produzione edilizia ha generato una pressione crescente sui sistemi energetici. La situazione rischia inoltre di esacerbarsi nel prossimo futuro, dal momento che le stime al 2050 prospettano un ulteriore incremento demografico di circa 2.5 miliardi di persone (IEA, 2013). Negli anni del *boom* economico, il bisogno urgente di nuove infrastrutture è stato soddisfatto favorendo l'espansione massiccia del settore delle costruzioni (Fig.5); la quantità veniva anteposta alla qualità degli edifici, la scelta delle tecnologie era diretta su tecnologie come l'acciaio e il calcestruzzo, ampiamente disponibili seppur impattanti sull'ambiente, e di frequente i nuovi edifici presentavano difetti ed errori di

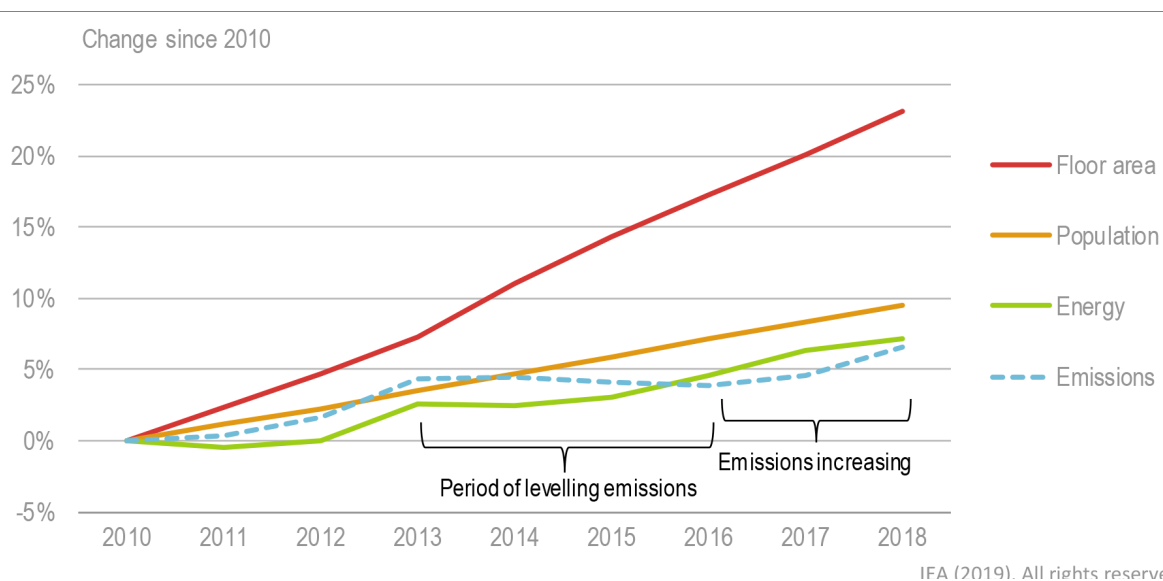


Fig.5 - Incremento della percentuale di superficie costruita relazionata all'aumento dei consumi energetici nel periodo 2010-2018 (Credits: IEA. (2019). *2019 Global Status Report for Buildings and Construction*. [Online] Available at: <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019> (Accessed: 5th January 2022))

messa in opera. Per questi motivi, il quadro che ci perviene oggi è quello di un patrimonio edilizio estremamente energivoro, responsabile da solo del 40% dei consumi energetici europei. Nel secondo caso invece, l'impatto ambientale associato alle costruzioni si lega alle modalità di sfruttamento delle risorse all'interno delle filiere di produzione edile. Come per altri settori, si stima infatti che circa la metà della produzione di gas climalteranti sia originata da processi di estrazione e di trasformazione delle materie prime, con la sola industria del calcestruzzo responsabile dell'8% delle emissioni globali di CO₂ (Lehne e Preston, 2018). Alla luce di questo scenario, appare dunque chiaro come il raggiungimento degli obiettivi di neutralità climatica non possa prescindere dalla decarbonizzazione del comparto AEC, un imperativo che richiama, da un lato, la valorizzazione delle filiere di sfruttamento delle risorse e, dall'altro, l'efficientamento e l'incremento della qualità dei processi edilizi. In particolare, le principali linee di ricerca che interesseranno il comparto delle costruzioni nel prossimo futuro, dirette a raggiungere il target di abbattimento del 77% delle emissioni di CO₂ entro il 2050, riguarderanno contemporaneamente:

- **La ricerca e lo sviluppo di tecnologie costruttive innovative**, altamente performanti e – contemporaneamente, a ridotto impatto ambientale. Si inseriscono per esempio in questo filone le ricerche sul campo delle tecnologie costruttive *low-tech*, che sfruttano materiali eco-compatibili e con ridotto impatto del ciclo di vita, come terra cruda, argilla e cartone;
- **Gli strumenti e gli approcci da adottare per potenziare la qualità delle opere** e riallineare le prestazioni tra progetto e costruzione, elemento propedeutico a garantire il contenimento delle dispersioni in fase di uso, la certezza di tempi e costi di realizzazione;
- **L'efficientamento delle catene di produzione**, in particolare di quelle industrializzate, per razionalizzare e ottimizzare l'uso delle risorse, sia materiali che immateriali, all'interno del processo edilizio, ridurre gli sprechi e la produzione di rifiuti.

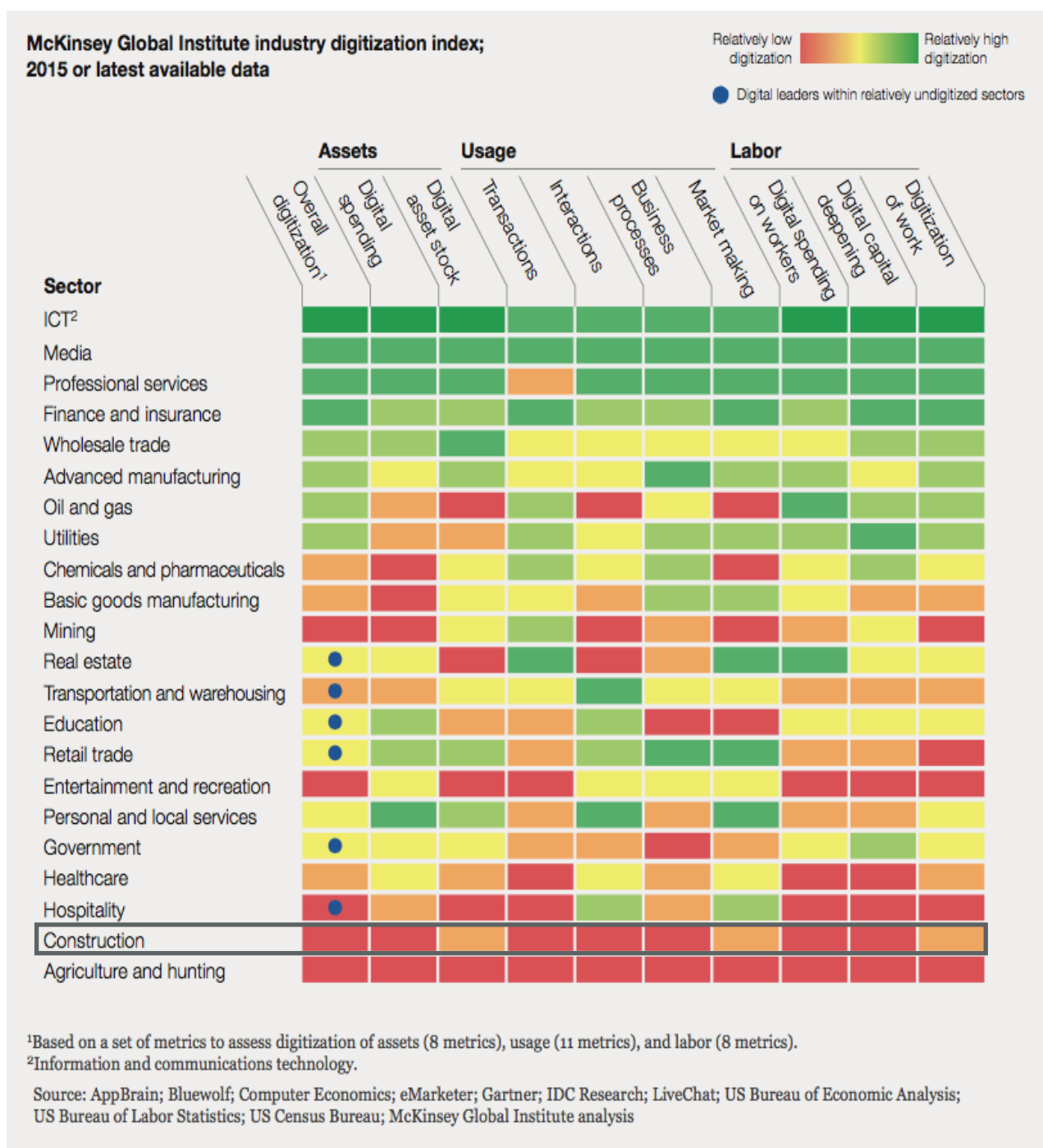
1.2. Fattori di inefficienza nella gestione dei processi edilizi

La problematica energetico-ambientale che riguarda il settore AEC è – seppur indirettamente – originata anche da una serie di inefficienze che coinvolgono la gestione dei processi edilizi e la capacità di controllo delle opere: frequente presenza di difetti nei prodotti, errori di realizzazione in cantiere e necessità di ricorso a varianti, dilatazione dei tempi e dei costi di intervento. L'indeterminatezza delle opere è una problematica che affligge da anni il settore delle costruzioni, principalmente causata dalla mancanza di adeguata programmazione e di opportuni strumenti di controllo. Alcuni studi di settore hanno per esempio messo in evidenza come i tempi inizialmente stimati per la conclusione di un progetto subiscano in media un'estensione del 20%; in Italia, un rapporto dell'ANCE del 2016 stimava addirittura che lo sfioramento dei tempi rispetto al cronoprogramma riguardasse il 70% delle opere pubbliche (ANCE, 2016). La scarsa programmazione e il ritardo nella consegna delle opere comporta inevitabilmente anche un aumento nei costi di realizzazione; a questo proposito, si stima che l'80% delle opere presenti, al termine dei lavori, uno sfioramento rispetto a quanto stabilito dal quadro economico (Agarwal *et al.*, 2016; Abanda *et al.*, 2017).

Una delle principali cause di tali inefficienze risiede nella struttura dei *workflow* dei processi edilizi. La maggioranza degli schemi organizzativi si basa infatti su una rigida sequenzialità "a cascata", in cui ciascun operatore esegue la propria attività in maniera compartimentata rispetto alle altre fasi e competenze coinvolte. La discretizzazione del processo comporta un notevole aggravio di lavoro per tutti gli attori, dal momento che ogni modifica deve essere discussa e coordinata tra una molteplicità di professionisti che non comunicano reciprocamente, dopodiché trasferita – da parte di ciascun operatore – sulla rispettiva documentazione di progetto. Un approccio di questo tipo genera un flusso di comunicazione intermittente, nel quale non di rado si verificano perdite di informazioni, errori nella trasmissione dei dati e incongruenze sugli elaborati finali (tavole tecniche, computi, capitolati, ecc.). Nello scenario del progetto contemporaneo, un tale tipo di approccio non consente infatti di gestire la sempre maggiore complessità – di natura tecnico-costruttiva e amministrativa – delle opere, che richiede piuttosto di coordinare e gestire un flusso continuo di dati e *feedback* che vengono scambiati tra innumerevoli attori e competenze coinvolte. L'integrazione delle informazioni risulta una condizione propedeutica non solo ad accelerare la realizzazione delle opere, ma anche a (ri)stabilire la congruenza del processo edilizio nelle sue diverse fasi di approfondimento, ovvero a garantire la qualità delle opere e minimizzare il rischio di errori e modifiche successive. Tuttavia, rispetto a tale necessità, la filiera costruttiva risulta fortemente arretrata, soprattutto in considerazione dello scarso grado di digitalizzazione che caratterizza i processi edilizi. A questo proposito, uno studio del 2016 ha messo in luce come il settore delle costruzioni sia tra quelli con il minore grado di integrazione di tecnologie digitali (ICTs) per la gestione dei flussi di lavoro, secondo soltanto ai settori dell'agricoltura e della caccia (Agarwal *et al.*, 2016) (Fig.6). In particolare, il grado di digitalizzazione è stato valutato nelle tre aree di implementazione e investimento (1) As-

Fig. 6 - Comparazione del livello di digitalizzazione tra il comparto AEC e gli altri settori produttivi (Credits: Agarwal, B. R., Chandrasekaran, S., & Sridhar, M. (2016) *Imagining Construction's Digital Future*. [Online] Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/imagining-constructions-digital-future#> (Accessed: 5th January 2022))

sets (Risorse), (2) Usage (Utilizzo) e (3) Labor (Lavoro), che considerano rispettivamente: la centralità di strategie di digitalizzazione nella programmazione economica delle aziende che operano nel settore edile; l'impiego di sistemi ICTs nelle attività delle imprese come lo sviluppo di nuovi prodotti e la loro commercializzazione; il grado di interazione tra la manodopera e le tecnologie digitali. Il ritardo nell'aggiornamento dei processi edilizi in chiave digitale si riversa in una serie di vulnerabilità ed elementi di inefficienza delle opere, tra cui: limitata capacità di controllo dei processi edilizi, presenza di errori e difetti negli edifici, stop forzati delle attività, dilatazione incontrollata di tempi e costi di intervento, produzione non allineata alla domanda di mercato (sotto o sovra-produzione).



Accanto alle modalità gestionali del processo edilizio, un ulteriore fattore che contribuisce alla indeterminatezza delle opere riguarda l'obsolescenza delle tecniche costruttive. La maggior parte delle nuove costruzioni prevede infatti ancora oggi l'impiego di tecniche realizzative tradizionali, in cui l'esecuzione delle sequenze di trasformazione, lavorazione e assemblaggio degli elementi costruttivi avviene direttamente in cantiere, che diventa una vera e propria "fabbrica all'aperto", in cui devono essere coordinate una molteplicità di operazioni e maestranze. Si tratta però di un luogo fortemente suscettibile alle condizioni esterne, che espone le attività di realizzazione delle opere al rischio di rallentamenti, sospensioni delle lavorazioni, errori di messa in opera, infortuni e incidenti². Per questo motivo, la realizzazione delle opere si sta spostando sempre di più verso logiche di prefabbricazione edilizia e produzione industrializzata, spostando le sequenze realizzative all'interno di fabbriche che adottano modelli di produzione industrializzata, affini per esempio ai settori dell'*automotive* e aerospaziale. Nell'indagare lo stato di consistenza del settore AEC, questo diverso modo di concepire gli edifici richiede di adottare una chiave di lettura secondo cui le imprese che *realizzano* le opere sono ad oggi più propriamente aziende che *producono* componenti e/o parti di sistemi più complessi (gli edifici), e presuppone che tali realtà siano destinatarie dei contenuti di programmazione internazionale indirizzati alla decarbonizzazione dei comparti di produzione industriale.

Le criticità con cui si confronta il settore delle costruzioni contribuiscono a esacerbare le precitate problematiche ambientali, e prospettano un insieme di fattori di inefficienza che riguardano l'intero ciclo di vita delle opere, tra cui: scarsa qualità delle costruzioni, mancato controllo di tempi e costi di intervento, depauperamento delle risorse, insicurezza per i lavoratori. Tali fattori non solo limitano la capacità di risposta delle opere alle esigenze della comunità, ma contribuiscono anche all'impoverimento del settore AEC, limitandone la competitività e le possibilità di sviluppo rispetto agli altri settori economici. Le inefficienze gestionali che si sono delineate risultano attualmente non ancora completamente risolte da parte degli operatori del settore, e il quadro che ne perviene è quello di un comparto produttivo significativamente arretrato rispetto agli altri settori industriali, nonché profondamente vulnerabile nei confronti di una serie di sfide imminenti: scarsità di risorse, diminuzione del tasso di occupazione, migrazione della manodopera verso altri comparti produttivi.

2. Sul tema della sicurezza per i lavoratori del comparto edile, alcuni studi di settore hanno evidenziato come le costruzioni siano uno dei settori con il più alto tasso di incidenti e costi associati a incidenti sul luogo di lavoro (VEGA Engineering, 2019; Schwatka *et al.*, 2012). Uno studio del 2009 ha inoltre evidenziato che i lavoratori del settore edile sono sottoposti a turni di lavoro più lunghi rispetto, per esempio, agli impiegati nei settori gestionale, tecnologico e militare, un fattore che può contribuire in maniera sostanziale ad aumentare lo stress, verificarsi di disturbi psico-fisici e malattie croniche (Lingard e Francis, 2009, Cit. Smith, 2009 p. 86).

1.3. La produzione edilizia *off-site*: un'opportunità per garantire la qualità e l'efficienza dei processi edilizi

Tradizionalmente, si pensa al costruire come ad un'azione che avviene nello stesso luogo in cui sorge l'edificio. Il cantiere è infatti il luogo principale in cui avvengono le sequenze di trasformazione dei materiali e dei semilavorati, che vengono successivamente assemblati per la realizzazione dell'edificio. La sua impostazione più comune è quella di una realtà con una dimensione prevalentemente artigianale, in cui il controllo della qualità costruttiva e il buon esito dell'opera (rispetto dei tempi e dei costi previsti, aderenza tra progetto ed esecuzione, ecc.) sono strettamente legate all'esperienza e alla capacità professionale delle maestranze che vi operano. Si tratta inoltre di un luogo fortemente suscettibile alle condizioni esterne, che possono compromettere il regolare svolgimento delle attività. Come si è visto, è proprio questo tipo di impostazione a rappresentare uno dei maggiori fattori di imprevedibilità per i processi edilizi, a cui sono imputabili una serie di inefficienze che ne condizionano la sostenibilità in tutte le sue declinazioni: ritardi, errori, elevata produzione di rifiuti e di scarti, insicurezza per i lavoratori (Fig.7).

Opposta rispetto alla prassi tradizionale, la **prefabbricazione edilizia** è invece un processo costruttivo che prevede la preparazione di elementi costruttivi, componenti e/o parti dell'edificio in una sede diversa dal cantiere, ovvero l'officina/fabbrica. Qui avviene l'assemblaggio delle parti strutturali (per esempio telai o pannelli), che vengono progressivamente completate, a seconda del grado di prefabbricazione richiesto, con sistemi di chiusura, finiture interne e/o esterne, fino all'integrazione di cablaggi e terminali di impianto. I componenti pre-finiti in azienda vengono quindi stoccati e successivamente trasportati nel sito in cui sorgerà l'edificio, dove vengono sollevati, posati e installati attraverso varie tecniche di giunzione (generalmente a secco come piastre, bullonatura, chiodatura, ecc.). Gran parte della vera e propria realizzazione dell'edificio viene quindi spostata all'interno di un ambiente controllato, non influenzato da fattori esterni, in cui è possibile gestire con precisione ogni fase del processo realizzativo, mentre il cantiere diventa il luogo preposto al solo assemblaggio finale (Figg.8,9).

Le operazioni di cantiere risultano perciò sostanzialmente semplificate e velocizzate, e richiedono la presenza di un numero ridotto di maestranze rispetto alle tecniche di costruzione tradizionali – fino al 9.5% in meno (Boafo *et al.*, 2016). La prefabbricazione degli elementi *off-site* consente di ridurre notevolmente l'impatto delle attività di cantiere, sia in termini di interferenza con le altre attività circostanti che di contenimento dei tempi di intervento. A questo



Fig.7 - L'approccio tradizionale alle costruzioni prevede di sviluppare tutte le sequenze realizzative in opera. Nell'immagine, un operatore si appresta ad eseguire un getto di calcestruzzo in cantiere (Credits: © Kolfor, 2010 da commons.wikimedia.org (Creative Commons Licence))

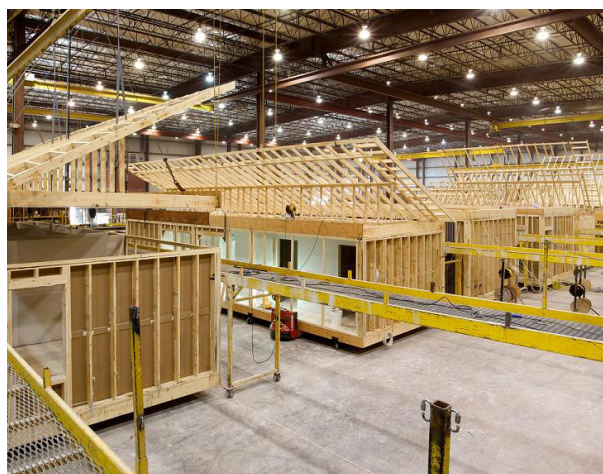


Fig.8 - La prefabbricazione prevede di spostare le attività realizzative degli edifici all'interno di un ambiente controllato quale l'officina. Nell'immagine, fabbrica per la produzione *off-site* di unità volumetriche in legno (Credits: Shore Modular, 2014: www.shoremodular.com)



Fig.9 - La realizzazione *off-site* di parti e componenti di edifici adotta un approccio produttivo industrializzato. L'immagine mostra la catena di produzione di pannelli prefabbricati a telaio in legno (Credits: Homag; www.homag.com)

proposito, alcune ricerche hanno stimato che, svincolando la costruzione dall'incidenza degli imprevisti del cantiere, ovvero dai tempi di attesa, e ottimizzando le sequenze di produzione *off-site*, si riesca ad ottenere una riduzione dei tempi di costruzione fino al 50-70% rispetto all'uso di tecniche tradizionali (Smith, 2010).

Gli edifici realizzati attraverso tecnologie prefabbricate possono dunque essere completati in breve tempo, richiedendo l'utilizzo di pochi macchinari e provocando minimo disturbo per il contesto intorno (rumori, polveri, ecc.) (Arieff e Burkhart, 2002; Smith, 2010). In virtù di queste caratteristiche, le tecniche di prefabbricazione sono oggi largamente impiegate per la realizzazione di interventi in contesti densamente edificati, in cui l'esigenza è quella di completare le opere in breve tempo senza interrompere le attività circostanti, così come in ambiti emergenziali (post-disastro, emergenze sanitarie e/o umanitarie) in cui sono richiesti tempi brevissimi per la fornitura di spazi di accoglienza. Si pensi per esempio al contributo essenziale che la prefabbricazione edilizia ha dato per la realizzazione di ospedali, residenze sanitarie e *hub* vaccinali nell'ambito della crisi pandemica legata al virus Covid-19, consentendo in pochi giorni di allestire gli spazi necessari a fronteggiare l'emergenza sanitaria. Per esempio a Wuhan (Cina), epicentro della diffusione del virus, nelle prime settimane di esponenziale aumento dei casi di contagio, è stata realizzata una struttura ospedaliera prefabbricata di 25mila metri quadrati in soli dieci giorni, grazie all'utilizzo di unità modulari pre-assemblate fuori opera.

Alla rapidità e semplicità di installazione dei componenti prefabbricati, si aggiungono i benefici derivanti dalla possibilità di maggiore controllo della qualità dei componenti edilizi e, più in generale, di tutto il processo realizzativo. Lo spostamento delle attività dal cantiere all'officina consente infatti di svincolare la costruzione da tutti gli imprevisti che possono sopraggiungere in sito, come il verificarsi di condizioni climatiche avverse, che possono comportare la sospensione delle lavorazioni. Al contrario, all'interno della fabbrica, la produzione dei componenti non è soggetta a stop forzati, e ciò garantisce di poter completare le opere nei tempi e nei costi stabiliti in fase di programmazione. La prevedibilità del prodotto/processo è assicurata anche dalla possibilità di razionalizzare la fabbricazione secondo sequenze standardizzate, in cui la qualità dei prodotti è costantemente monitorata per verificare, ad ogni passaggio, la rispondenza dei componenti alle specifiche del progetto (Arieff e Burkhart, 2002; Bofo *et al.*, 2016; Krug e Miles, 2013).

Da un punto di vista ambientale, l'impiego di tecniche di prefabbricazione consente di ridurre dell'impatto provocato dalle attività di costruzione, aumentando inoltre la circolarità delle risorse all'interno del processo edilizio. La produzione *off-site* presenta infatti un minore fabbisogno energetico comparato alle tecniche tradizionali, e produce di conseguenza un ridotto quantitativo di emissioni inquinanti (Du *et al.*, 2019; Pons, 2013; Teng e Pan, 2020). A questo si aggiunge che l'uso di tecniche di assemblaggio a secco risulta fondamentale per abilitare la dismissione e la separazione selettiva degli elementi costruttivi al termine dell'uso degli edifici; in questo modo, ciascun componente e/o materiale può essere reimmesso all'interno di altre catene di valore, per esempio avviandoli a riuso, riciclo o rimanifattura, riducendo l'incidenza dei rifiuti da costruzione fino all'84% (Boafo *et al.*, 2016). La riduzione dell'impatto ambientale è inoltre potenziata dall'ottimizzazione delle risorse all'interno del processo di prefabbricazione. Difatti, sfruttando logiche organizzative industriali, la fabbricazione dei componenti adotta strategie commerciali *customer-pull*, in cui la produzione è attivata dalla domanda di mercato, ovvero dagli ordini dei clienti. In questo modo le aziende di prefabbricazione producono solo ciò che verrà effettivamente venduto, gestendo il magazzino in sincrono con gli ordini per evitare accumuli di materiale inutilizzato e giacenze a lungo termine (costruzione "*just-in-time*"), che richiedono costi aggiuntivi per la manutenzione (Smith e Quale, 2017).

Ai benefici citati si aggiungono infine le implicazioni di natura socio-economica. Seppure i vantaggi in questo senso siano più difficilmente quantificabili, alcune ricerche hanno messo in relazione l'uso di tecnologie prefabbricate con un aumento della produttività nei processi edilizi (Jansen van Vuuren e Middleton, 2020). Questo è anche conseguenza di un deciso miglioramento delle condizioni di lavoro delle maestranze, che si trovano ad operare in un ambiente sicuro e controllato, in cui vi è un minor rischio di incidenti e infortuni (Arieff e Burkhart, 2002; Krug e Miles, 2013). A questo proposito, uno studio dell'International Labour Organization ha stimato che l'adozione di tecniche di prefabbricazione contribuisce a dimezzare il numero di incidenti sul lavoro (Smith e Quale, 2017). Il tema della manodopera si lega anche a benefici di natura economica che l'uso di tecniche costruttive *off-site* può generare per i committenti delle opere. Il costo del lavoro per gli operai del settore edile in Europa è infatti in costante crescita, e incide ormai in maniera sostanziale sul budget delle costruzioni. Lo spostamento delle sequenze costruttive all'interno della fabbrica consente invece di ridurre il numero di operatori necessari alla realizzazione delle opere, dal momento che le sequenze di trasformazione-assemblaggio vengono razionalizzate seguendo i principi della produzione meccanizzata, permettendo di contenere i costi associati ai nuovi edifici.



Fig.10 - Fasi di messa in opera di unità modulari prefabbricate (Credits: Koma Modular Construction s.r.o. da commons.wikimedia.org (Creative Commons Licence))



Fig.11 - Installazione in cantiere di pannelli prefabbricati (Credits: Rubner: www.rubner.com)

1.4. Economia circolare: nuovo paradigma dello sviluppo sostenibile

Il raggiungimento degli obiettivi internazionali di neutralità climatica risulta intrinsecamente connesso ad un processo di radicale ripensamento dei modelli di produzione e consumo tradizionali. Negli ultimi 40 anni, a causa dell'aumento demografico, l'estrazione di materiali ha subito un aumento da 27 a 92 miliardi di tonnellate, arrivando a coprire il 62% delle emissioni di gas serra globali. Da un punto di vista economico, la stretta dipendenza dello sviluppo globale dall'uso intensivo delle risorse primarie espone inoltre i settori produttivi ad essere vulnerabili nei confronti di alcuni fenomeni che, già in atto, si inaspriranno nel prossimo futuro: aumento della popolazione e della domanda di prodotti e servizi, scarsità di risorse, incremento dei prezzi dei materiali e della manodopera.

Per invertire questa tendenza, il macro-obiettivo a cui guardano le *policies* internazionali è quello del *decoupling*, ovvero di svincolare il progresso economico dallo sfruttamento intensivo delle risorse e dalla conseguente produzione di emissioni inquinanti e rifiuti. Per indirizzare questo cambiamento, negli ultimi anni gli strumenti di programmazione internazionale (Agenda 2030 e SDGs, Green Deal Europeo) hanno progressivamente adottato i principi propri dell'economia circolare, un modello di sviluppo che "offre una chiave di lettura particolarmente efficace del cambiamento all'insegna della sostenibilità" (Gusmerotti *et al.*, 2020, p. 9) (Fig.12). Il concetto di economia circolare, seppure non sia stato definito in letteratura in maniera univoca, può essere descritto come "un sistema in cui gli scarti e l'inquinamento sono minimizzati grazie al design consapevole di prodotti, processi e servizi, il valore delle risorse è mantenuto il più a lungo possibile e i sistemi naturali vengono rigenerati" (Gusmerotti *et al.*, 2020, p. 9). La Ellen MacArthur Foundation nel 2012 ha inoltre definito l'economia circolare come "Un sistema industriale che è ristorativo o rigenerativo per intenzione e design, [...] che sostituisce il concetto di 'fine vita' con quello di ripristino, [...] e mira all'eliminazione dei rifiuti attraverso una migliore progettazione dei materiali, prodotti, sistemi" (Ellen MacArthur Foundation, 2013, p. 7). Un'ulteriore definizione inquadra l'economia circolare come "un modello economico finalizzato all'uso efficiente delle risorse attraverso la riduzione dei rifiuti, il mantenimento del valore sul lungo periodo, la riduzione delle risorse primarie, e cicli chiusi per i prodotti, le loro parti e materiali, all'interno dei confini della salvaguardia ambientale e dei benefici socioeconomici" (Morseletto, 2020).

Il concetto di economia circolare prende avvio nel contesto di alcune discipline e approcci economici che ne hanno condizionato l'evoluzione e le teorie di riferimento. In particolare, tra le principali discipline che hanno influenzato l'economia circolare si citano (Gusmerotti *et al.*, 2020; Sesana e Salvalai, 2013):

- **L'economia ambientale**, a cui si deve per prima l'approfondimento delle problematiche relative alla gestione razionale delle risorse, anche in previsione della fruibilità di quelle non rinnovabili da parte delle future generazioni, nonché delle relazioni tra i sistemi economici e quelli ambientali. È nell'ambito dell'economia ambientale che si suggerisce, per la prima volta, la necessità di un sistema economico circolare come "prerequisito per il mantenimento della sostenibilità umana sulla Terra" (Boulding, 1966, Cit. in Gusmerotti *et al.*, 2020, p. 26);
- **L'economia ecologica**, che evidenzia la stretta interdipendenza tra le risorse naturali e le funzioni ecosistemiche su cui, a loro volta, si basano i sistemi produttivi; alle teorie dell'economia ecologica si deve la consapevolezza che le scelte locali possono produrre conseguenze irreversibili su larga scala, ed è perciò imperativo abbandonare quei modelli economici che non sono in grado di prevedere e gestire le problematiche ecologiche globali;
- **L'ecologia industriale**, che promuove l'analisi sistemica e integrata del sistema industriale per analizzarne i flussi di materiali ed energia, oltre alle sue interazioni con l'ambiente esterno. Nell'ambito di tale disciplina si affermano i principi della valorizzazione dei rifiuti, della diminuzione degli scarti e della dematerializzazione dell'economia,

PRINCIPLE

1

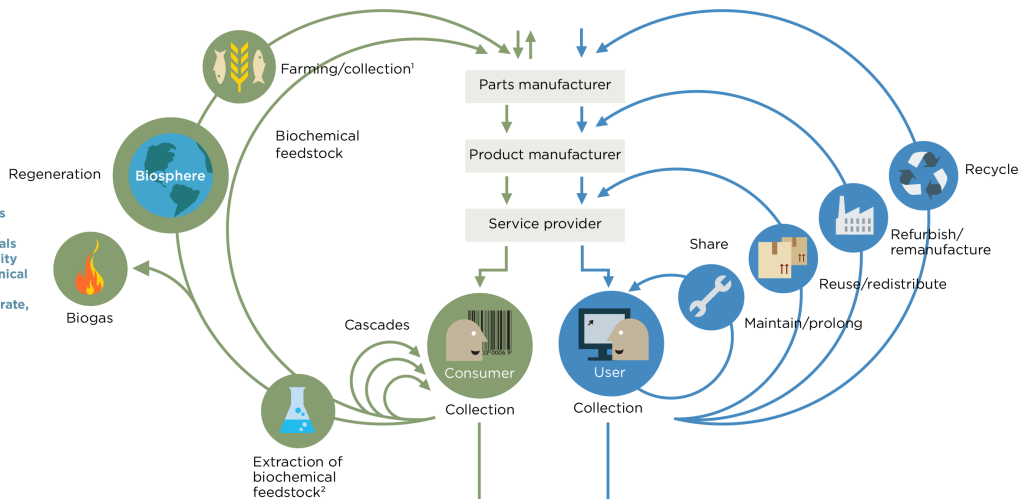
Preserve and enhance natural capital by controlling finite stocks and balancing renewable resource flows
 ReSOLVE levers: regenerate, virtualise, exchange



PRINCIPLE

2

Optimise resource yields by circulating products, components and materials in use at the highest utility at all times in both technical and biological cycles
 ReSOLVE levers: regenerate, share, optimise, loop



PRINCIPLE

3

Foster system effectiveness by revealing and designing out negative externalities
 All ReSOLVE levers

1. Hunting and fishing
 2. Can take both post-harvest and post-consumer waste as an input
 Source: Ellen MacArthur Foundation, SUN, and McKinsey Center for Business and Environment; Drawing from Braungart & McDonough, Cradle to Cradle (C2C).

Fig.12 - Principi caratterizzanti del modello di economia circolare (Credits: Ellen MacArthur Foundation & McKinsey Center for Business and Environment (2015) Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe. [Online] Available at: <https://emf.thirdlight.com/link/8izw1qhm1-4ga-404tsz/@/preview/1?o> (Accessed: 5th January 2022))

privilegiando l’uso di servizi piuttosto che di prodotti;

- La **biomimetica**, che si ispira alle soluzioni messe in atto dalla natura per lo sviluppo di prodotti, tecnologie e processi innovativi ed ecologici, in grado di minimizzare, se non azzerare, il proprio impatto sugli ecosistemi circostanti.

Da tale quadro disciplinare sono inoltre emersi alcuni approcci di riferimento per le teorie dell’economia circolare. Nello specifico, tra quelli maggiormente ricorrenti si citano:

- Il **Cradle-to-cradle (C2C)**: è uno dei concetti che maggiormente hanno ispirato il modello economico circolare, poiché si basa principio “*waste equals food*”, cioè sulla considerazione che tutti i materiali, al termine del loro ciclo di uso, possono essere reimmessi nei sistemi di produzione, diventando a loro volta risorse di valore. L’approccio C2C supera la concezione di quello “Cradle to grave”, che attribuisce valore alle materie solo fino alla fase di smaltimento, compiendo un ulteriore passo in avanti per chiudere il *loop* e sfruttare ciclicamente il valore – energia accumulata per la produzione, potenziale di inquinamento – delle risorse;
- La **Performance economy**, un approccio che mira a potenziare gli impatti sociali delle scelte produttive ed economiche, per esempio favorendo – attraverso nuovi modelli di business associati al riuso/riciclo/rimanifattura dei prodotti – la creazione di nuovi posti di lavoro, l’attivazione di nuovi segmenti di mercato e/o la fornitura di nuove materie prime;
- Il **System thinking**, una modalità di pensiero olistico che analizza le molteplici interconnessioni che ciascun sistema produttivo instaura con gli assetti sociali, culturali e ambientali del contesto che lo circonda. L’approccio siste-

mico si basa sulla risposta ad una serie di domande inerenti il ciclo di vita dei prodotti, tra cui: come è possibile generare valore da tutte le risorse (anche dagli scarti)? Quali sono gli impatti ambientali che un determinato prodotto o servizio produce sugli ecosistemi? Quali sono le ricadute delle scelte progettuali sui sistemi ambientali, economici e sociali di contesto?

- Il **Life-cycle thinking, evaluation e/o assessment**: si tratta di un insieme di particolari approcci e metodologie di valutazione degli impatti di prodotti e servizi, improntato alla quantificazione dei carichi energetici e dei potenziali di emissione associati al loro ciclo di vita. La misurazione avviene attraverso il protocollo Life Cycle Assessment (LCA), uno strumento analitico per la valutazione degli impatti del ciclo di vita di prodotti e servizi. Lo standard LCA è regolato a livello internazionale dalla norma ISO 14040:2006, che prevede uno studio di valutazione attraverso una sequenza strutturata di fasi consecutive: definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, compilazione di un inventario degli input e output del sistema e valutazione degli impatti ad essi correlati, interpretazione dei risultati. Dall'evoluzione delle teorie e degli strumenti propri dell'LCA si è sviluppato l'approccio Life Cycle Cost (LCC), utilizzato per quantificare il costo totale di un determinato prodotto e/o servizio lungo il suo ciclo di vita; l'innovazione consiste nel considerare non solo il costo di acquisto, ma anche tutti i costi indiretti derivanti, per esempio, dalla manutenzione e gestione, dalla spesa energetica, nonché dalla necessità di trattamento dei materiali a fine vita³. L'importanza dell'approccio *life-cycle*, nelle sue diverse declinazioni, risiede nel fatto che offre gli strumenti per l'anticipazione degli impatti scaturiti dalla scelta di un determinato prodotto e/o servizio, consentendo la comparazione tra diverse opzioni progettuali e la selezione di quelle maggiormente sostenibili. Per questo motivo, gli approcci orientati al Life-cycle thinking vengono sempre più spesso adoperati come strumento decisionale di supporto fin dalle fasi preliminari di progetto e, nel settore pubblico, sono stati progressivamente integrati dagli strumenti normativi che regolano le procedure di selezione delle offerte nelle gare di appalto.

3. È importante però notare che nello spettro dei costi indiretti non sono ricompresi quelli – ugualmente impattanti ma difficilmente quantificabili – associati a salute, benessere e sicurezza di utenti, consumatori e lavoratori.

La transizione verso un'economia circolare [...] implica la capacità di innovare [...] cicli produttivi e modelli di consumo

Nava e Mistretta, 2019

I paradigmi dell'economia circolare che emergono da tale contesto scientifico possono essere sintetizzati come la ciclicità dei prodotti/servizi e la valorizzazione delle risorse nel ciclo di vita di questi ultimi, finalizzata a ridurre la necessità di estrazione di materie prime vergini, azzerare la produzione di rifiuti e di emissioni inquinanti. Secondo questi principi, le azioni e strategie prioritarie da implementare per favorire la transizione degli attuali assetti economico-produttivi da modelli di tipo lineare (*take-make-waste*) a circolare possono essere sintetizzate come:

- **Riduzione del consumo di risorse, dei rifiuti e delle emissioni** lungo l'intero ciclo di vita dei beni;
- **Riutilizzo di materiali di scarto e/o dei prodotti** stessi, in modo da reimmetterli nei cicli di produzione con minima riparazione o riprocesso (*refurbishment/remanufacturing*) e preservare il valore dell'energia spesa per l'estrazione e trasformazione delle materie prime;
- **Riciclaggio dei rifiuti**, che può avvenire in molteplici forme e dare luogo ad una varietà di prodotti. Nell'ottica di una perfetta circolarità, i prodotti e i materiali dovrebbero poter essere riciclati mantenendo le loro proprietà (riciclaggio o *upcycling*), richiedere bassi investimenti energetici per essere trasformati, e dare luogo a nuovi prodotti con costi di acquisto competitivi rispetto all'uso di materie vergini.

Rispetto alla questione del trattamento dei materiali a fine vita, gli Stati europei hanno cominciato ad esaminare possibili soluzioni da adottare per favorire una gestione sostenibile e virtuosa dei rifiuti; uno degli approcci politici emergenti, e ritenuto tra i più efficaci, è la cosiddetta *Extendend Producer Responsibility (EPR)* (Responsabilità Estesa del Produttore), secondo cui la responsabilità per il trattamento dei prodotti post-consumo viene attribuita al produttore, incentivando così il settore privato a prevenire la produzione di rifiuti e a prevedere, anche attraverso un'adeguata progettazione dei beni, opzioni sostenibili per la gestione delle risorse a fine vita.

A livello di programmazione internazionale, le potenzialità dell'economia circolare, in termini di abbattimento delle emissioni inquinanti, sfruttamento razionale delle risorse e sostenibilità, trovano corrispondenza nella **Strategia Europea per l'Energia e per il Clima**, il caposaldo della strategia per la transizione ecologica europea. Nell'ambito del programma, l'UE ha infatti compiuto una serie di passi per integrare progressivamente i principi dell'economia circolare nei modelli che guideranno lo sviluppo economico nei prossimi anni. I primi documenti emanati sono state le due comunicazioni COM(2014) 398 *Verso un'economia circolare: programma per un'Europa a zero rifiuti*, seguita l'anno successivo dalla COM(2015) 614 *L'anello mancante. Piano d'azione dell'Unione Europeo per l'economia circolare*, che hanno istituito il programma strategico per la promozione dei principi dell'economia circolare in tutti i Paesi dell'Unio-

ne. I contenuti delle due Comunicazioni circa la trasformazione in chiave di *green economy* sono stati successivamente consolidati attraverso la recente Comunicazione COM(2020) 98 *Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare. Per un'Europa più pulita e più competitiva*, che si allinea agli obiettivi programmatici del Green Deal Europeo – decarbonizzazione, valorizzazione delle risorse, riduzione dei rifiuti – per favorire una crescita economica sostenibile dell'Unione. Lo strumento prioritario su cui fa leva l'Europa per rendere operativi tali indirizzi è il **Piano d'Azione Europeo per l'Economia Circolare (PEEC)**, un quadro sistemico di strategie multi-scalari e multi-settoriali che intercetta operatori pubblici e privati (sia nei settori economico-produttivi che in quelli di azione sociale e culturale), consumatori e cittadini per innescare un ripensamento sostenibile dei modelli di produzione e consumo tradizionali. L'obiettivo che si intende trarre è quello di affermare un modello di crescita rigenerativo, che restituisca al pianeta più di quanto prenda, incoraggiando un uso virtuoso delle risorse quale “elemento essenziale di una trasformazione più ampia dell'industria verso la neutralità climatica e la competitività a lungo termine dell'intera Comunità Europea” (Commissione Europea, 2020c, p.6).



Tra le principali catene di valore dei prodotti su cui investire, il PEEC evidenzia anche quelle legate al settore edile, stimando nelle premesse che una maggiore efficienza dei prodotti da costruzione consentirebbe una riduzione fino all'80% delle emissioni inquinanti. In particolare, le linee di ricerca e innovazione che coinvolgono il comparto AEC sono:

- **L'integrazione di criteri ecologici nelle procedure di appalto** per i lavori pubblici, con lo scopo di incoraggiare la domanda di prodotti, materiali e tecnologie sostenibili;
- **La promozione di iniziative per ridurre l'impermeabilizzazione dei suoli**, anche prevedendo una sempre maggiore diffusione di tecnologie costruttive ad elevata reversibilità e dismissibilità selettiva;
- **La progettazione di prodotti a ridotto impatto ambientale**, realizzati con contenuti minimi di materia riciclata e riciclabile, per i quali è necessario prevedere, fin dalla fase di progetto, le modalità di dismissione e di reimmissione nei cicli produttivi;
- **La diffusione delle cosiddette “etichette ambientali”** (anche dette *ecolabels*, marchi ecologici o etichette ecologiche) per i materiali e componenti costruttivi, ovvero un sistema di certificazione a cui aderiscono le aziende (in alcuni casi su base volontaria, in altri obbligatoria) per comunicare ai consumatori in maniera chiara e sintetica le prestazioni ambientali dei prodotti;
- **L'ottimizzazione e l'aumento della circolarità delle catene produttive industriali**, con la finalità di mantenere il più a lungo possibile il valore intrinseco delle risorse, ridurre la produzione di rifiuti e recuperare dagli scarti almeno il 70% di materiale. Assumono importanza in questa prospettiva le tecnologie costruttive ad elevata durabilità, le strategie progettuali che garantiscono la riutilizzabilità dei prodotti, il loro *upgrading* e la riparabilità, nonché le piattaforme informatizzare per il tracciamento delle filiere.

A livello nazionale, i contenuti della programmazione europea stati recepiti e resi



operativi attraverso la promozione di una serie di azioni e politiche volte che trasferiscono gli indirizzi del PEEC nella cornice generale della **Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile**. La prima tappa del percorso italiano verso la transizione ecologica è stata segnata dalla redazione del documento *Economia circolare: verso un nuovo modello vincente per il sistema Italia*, accompagnato da un Tavolo di Lavoro istituito con i rappresentanti del settore produttivo. Il confronto con gli *stakeholders* ha fatto emergere la volontà e l'interesse, da parte degli operatori economici, di mettere a punto e perseguire strategie comuni in armonia con i principi di circolarità, decarbonizzazione e valorizzazione delle filiere industriali. Il confronto è stato replicato nel 2017 contestualmente alla pubblicazione del testo *Verso un modello di Economia Circolare per l'Italia* con l'istituzione di un ulteriore Tavolo di Lavoro. In questo caso, sono stati identificati una serie di indicatori per misurare la circolarità dei processi, che rappresentano un elemento chiave per verificare il progresso delle azioni intraprese, nonché per validarne l'efficacia nel raggiungimento dei target fissati dall'UE.

Sul piano legislativo, l'Italia si è mossa nel 2019 con l'istituzione della Direzione Generale per l'economia circolare presso il Ministero dell'Ambiente, del Territorio e del Mare, un organo che svolge funzioni inerenti al controllo e alla promozione della gestione sostenibile delle risorse, riferite sia ai settori produttivi privati che ai consumatori pubblici. A questo proposito, una delle principali novità introdotte dal Ministero riguarda l'integrazione di criteri ecologici nelle gare di appalto pubbliche. Si parla in questo senso di **Circular Procurement o Green Public Procurement (GPP)**, ovvero di un processo in cui le pubbliche amministrazioni (PA) acquistano prodotti e servizi ambientalmente sostenibili per contribuire alla diffusione di un'economia verde, improntata alla chiusura dei cicli di materia ed energia, alla minimizzazione degli impatti ambientali, della produzione di rifiuti e delle emissioni. L'importanza di promuovere logiche di sostenibilità nelle procedure pubbliche di acquisto si evince dall'ingente potere di mercato che è in capo al settore pubblico. Gli acquisti di beni e servizi da parte delle PA ricoprono infatti il 14% del PIL dell'UE, e l'integrazione di considerazioni ambientali per selezionare le offerte in sede di gara può incidere in maniera sostanziale a stimolare la domanda per prodotti e servizi ecologici, stimolandone la ricerca e sviluppo e il consolidamento sul mercato. Il concetto di GPP è stato inizialmente promosso da parte dell'UE attraverso la Comunicazione COM(2003) 302 *Politica Integrata dei Prodotti (IPP)*, che propone “[...] una strategia tesa a rafforzare e riorientare le politiche ambientali concernenti i prodotti, per promuovere lo sviluppo di un mercato di prodotti più ecologici”. La Comunicazione richiama il GPP quale motore trainante per una cultura ambientalmente consapevole e, richiedendo l'adozione di criteri ecologici per la selezione delle offerte nelle gare pubbliche, incentiva la domanda sul mercato per prodotti ambientalmente sostenibili. La compatibilità ambientale è interpretata in ottica di ciclo di vita, richiedendo alle amministrazioni pubbliche di valutare le ricadute – ambientali ed economiche – di prodotti e servizi nelle fasi di uso e manutenzione, smaltimento e gestione a fine vita. Un approccio di questo tipo si declina su tutta la molteplicità di beni e servizi in uso da parte del settore



pubblico e, per le opere edili, serve a favorire servizi di architettura con minore impatto ambientale, l'uso di materiali da costruzione ecocompatibili e a ridotto carico ambientale, nonché a selezionare le scelte tecnico-progettuali che maggiormente abilitano la circolarità delle risorse nei processi edilizi (COM(2003) 302). In Italia, le indicazioni del Libro Verde sono state recepite dal **Piano di Azione Nazionale per il Green Public Procurement** (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2007). Il programma di obiettivi individua a questo proposito undici aree prioritarie (Cap.3.6 – Le categorie) a cui destinare azioni e interventi che incentivino una maggiore sostenibilità del comparto pubblico. Tra le undici categorie, selezionate in base all'entità dell'impatto ambientale e del volume di spesa pubblica richiesta, si inserisce anche l'edilizia, nello specifico al punto 3.6.B) Costruzioni e ristrutturazioni di edifici con particolare attenzione ai materiali da costruzione.

Gli intenti definiti nel PAN GPP sono stati trasposti sul piano legislativo con la revisione del Codice Appalti⁴ nel 2016. In questo contesto, l'Italia ha infatti promulgato il cosiddetto **Decreto Criteri Ambientali Minimi (CAM)**⁵, requisiti cogenti di prestazione ambientale, definiti per una molteplicità di categorie merceologiche, che gli operatori economici devono dimostrare per poter presentare un'offerta in sede di gara di appalto. I CAM stabiliscono perciò le caratteristiche minime che l'offerta deve rispettare affinché siano assicurate "prestazioni ambientali al di sopra della media del settore", considerate in un'ottica di ciclo di vita, e forniscono degli indicatori rispetto ai quali selezionare le opzioni migliori sotto il profilo ambientale. La categoria merceologica dei CAM Edilizia è stata introdotta con il D.M. 11/10/2017, e descrive i criteri da applicare agli interventi di nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione (modalità di selezione dei candidati, caratteristiche specifiche per gruppi di edifici e singoli edifici), le specifiche tecniche dei componenti e prodotti edilizi, le specifiche tecniche del cantiere, i criteri di aggiudicazione, i criteri premianti e le condizioni di esecuzione delle opere. L'innovazione portata avanti dai CAM nel settore delle costruzioni consiste nell'aver reso obbligatoria la formulazione e integrazione di considerazioni ambientali che, prima del Decreto, erano lasciate alla discrezionalità del progettista, in particolare richiamando una maggiore attenzione all'impatto dell'intero ciclo di vita dell'edificio, alla circolarità delle risorse e alle modalità di gestione dei materiali a fasi di fine vita. Per esempio, l'art. 2.4.1.2 – Materia recuperata o riciclata stabilisce che "il contenuto di materia recuperata o riciclata nei materiali utilizzati per l'edificio [...] deve essere pari ad almeno il 15% in peso valutato sul totale di tutti i materiali utilizzati". Inoltre, "almeno il 50% peso/peso dei componenti edilizi e degli elementi prefabbricati, escludendo gli impianti, deve essere sottoponibile, a fine vita, a demolizione selettiva ed essere riciclabile o riutilizzabile" (art. 2.4.1.1 – Disassemblabilità). A tale proposito, "i progetti devono prevedere un piano per il disassemblaggio e la demolizione selettiva dell'opera a fine vita, che permetta il riutilizzo o il riciclo dei materiali, componenti edilizi e degli elementi prefabbricati utilizzati" (art. 2.3.7 – Fine vita). In questo scenario, il ruolo del progetto si arricchisce di nuovi valori e responsabilità, richiamando l'adozione di opportune scelte, tecnologico-costruttive e strategiche,



MINISTERO DELL'AMBIENTE
E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE

4. D.Lgs 19 aprile 2016, n.50

5. Attualmente l'Italia è l'unico Paese europeo ad aver reso cogente l'applicazione di criteri ambientali all'interno delle procedure di appalto pubbliche.

che richiedono una stretta collaborazione tra gli attori e operatori della filiera (progettisti, aziende) per verificare le prestazioni ambientali richieste. In questa prospettiva, l'approccio al progetto assimila strumenti e metodi propri dell'ecodesign, una progettazione di tipo ecologico attraverso cui si consegue, lungo tutto il ciclo di vita, una riduzione dei consumi di materie prime, di energia, delle emissioni ambientali, accrescendo la capacità di creare valore (Nava e Mistretta, 2019). Si tratta di operare scelte funzionali ad ottimizzare le risorse a disposizione, che consentano di prevedere, anticipandole, le modalità di gestione dei materiali al termine dell'uso, di dismettere e separare le diverse componenti per avviarle a riuso/riciclo, per esempio attraverso l'uso di tecniche di assemblaggio reversibili, oltre che di tracciare la filiera dei materiali lungo l'intero ciclo di vita delle opere.

La crescente domanda di prodotti e servizi ecologici da parte delle PA, che si estenderà nel prossimo futuro anche ai consumatori privati, e più in generale la transizione dei settori produttivi verso modelli di sviluppo economico circolari, innesca un processo di crescita anche per le aziende del settore privato della produzione edilizia. Queste possono infatti trovare nell'economia circolare i presupposti per una trasformazione all'insegna della resilienza e della competitività con gli altri settori, resa possibile dall'adattamento dei propri modelli di business o dalla creazione di nuovi. L'implementazione di modelli di impresa circolari richiede alle aziende di rivedere gli schemi con cui gestiscono i flussi di risorse, dall'approvvigionamento dei materiali alla progettazione dei prodotti/servizi, fino alle modalità di dismissione e reintegro delle risorse in altri cicli produttivi (propri o esterni) e alle relazioni con gli altri attori della filiera. Le principali strategie che caratterizzano i modelli di business circolari, che possono essere applicate anche al settore della produzione edile, sono riassunte nel *framework* **ReSOLVE** della Ellen Mac Arthur Foundation (Ellen MacArthur Foundation & McKinsey Center for Business and Environment, 2015) e sono:

- **Regenerate**: riguarda l'utilizzo di risorse, energetiche e materiali, provenienti da fonti rinnovabili, oltre all'inserimento delle stesse all'interno dell'ecosistema al termine dell'utilizzo, secondo un approccio ciclico dei flussi di materia;
- **Share**: presuppone l'allontanamento dal concetto di proprietà ed uso esclusivo dei beni in favore di forme condivise di utilizzazione di prodotti e servizi, progettati per una durata maggiore e mantenuti per prolungarne la vita utile;
- **Optimization**: si persegue attraverso il miglioramento delle performance dei prodotti e dei servizi, nonché attraverso l'efficientamento della produzione, attraverso l'impiego di tecnologie digitali per la riduzione degli sprechi e degli scarti di lavorazione;
- **Loop**: si basa sull'utilizzo dei cicli biologici o tecnici per mantenere quanto più a lungo possibile le risorse all'interno delle catene di valore. Si inseriscono nelle strategie di loop le tecniche di riciclaggio, riutilizzo, rimanifattura (cicli tecnici) o digestione anaerobica (ciclo biologico), che possono essere anche coadiuvate da sistemi informatizzati per facilitare il tracciamento e la reperibilità dei materiali;
- **Virtualization**: prevede l'utilizzo di sistemi IT per la sostituzione dei beni fisici con modelli digitali, dematerializzati, con cui i consumatori possono anche interagire;
- **Exchange**: implica l'impiego di materiali e tecnologie di produzione innovative per la graduale sostituzione dei prodotti e servizi obsoleti con quelli più avanzati e maggiormente circolari, che possono essere più facilmente riparati, che necessitano meno materiale per la produzione e generano meno rifiuti.

Gli operatori economici privati, tra cui quelli del comparto AEC, stanno guardando con sempre maggiore

interesse a tali strategie per trasformare i propri assetti tradizionali da modelli di sfruttamento lineare delle risorse a filiere circolari con potenziale di resilienza e competitività con gli altri settori. Il percorso in questa direzione prospetta infatti l'attivazione di nuovi segmenti di mercato, risparmio economico, riduzione della vulnerabilità rispetto alla futura indisponibilità di risorse. Una direzione che riguarda dunque anche ad obiettivi di crescita economica, soprattutto se si considera che attualmente circa il 40% del fatturato delle imprese è destinato all'acquisto di materie prime. L'impiego invece di risorse provenienti da fonti di riuso/riciclo risulta una scelta conveniente per aumentare gli utili, evitando perdite impreviste dovute all'instabilità dei prezzi sul mercato e diminuendo la dipendenza dalle fonti di approvvigionamento (Fig.13). Si calcola inoltre che l'applicazione dei principi dell'economia circolare nei settori industriali porterebbe ad un aumento fino a 700.000 nuovi posti di lavoro entro il 2030, in modo particolare all'interno di piccole e medie imprese (PMI), ovvero le realtà che attualmente rappresentano il 99% del tessuto produttivo europeo (Com-



1 Note that this is not a forecast of how costs will develop. It is an assessment of how costs could develop if Europe aggressively went after this agenda, and if all improvements were captured as cost savings. 2 The total savings are less than the sum of the savings of the separate levers due to overlap.

Source: Company and expert interviews; Web search; Eurostat household expenditure data; ACEA, *The Automobile Industry Pocket Guide*, 2015; Todd Alexander Litman, *Transportation Cost and Benefit Analysis: Techniques, Estimates and Implications*, Victoria Transport Policy Institute, 2009; Udo Jürgen Becker et al., *The True Costs of Automobility: External Costs of Cars: Overview on existing estimates in EU-27*, TU Dresden, 2012; ICCT, *European Vehicle Market Statistics Pocketbook*, 2013; ICE database of CO2 embedded in material; Frances Moore and Delavane Diaz, *Temperature Impacts on Economic Growth Warrant Stringent Mitigation Policy*, Nature Climate Change, 2015; MGI, *Overcoming obesity: An initial economic analysis*, 2014; FAO, *Global food losses and food waste - Extent, Causes and Prevention*, 2011; EEA, *Towards efficient use of water resources in Europe*, 2012; EU Commission, *Official journal of the EU, Commission Agriculture and Rural Development, 2012 budget*, 2012; FAOSTAT; Kimo van Dijk, *Present and future phosphorus use in Europe: food system scenario analyses*, Wageningen University, 2014; Josef Schmidhuber, *The EU Diet - Evolution, Evaluation and Impacts of the CAP*, FAO, 2008; Gregor Zupancic and Viktor Grilc, *Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste*, 2012; Joint Research Centre (JRC) of the European Commission et al., *Precision agriculture: an opportunity for EU farmers - potential support with the CAP 2014-2020*, 2014; Laure Itard et al., *Building Renovation and Modernisation in Europe: State of the art review*, TU Delft, 2008; BPIE, *Europe's buildings under the microscope: A country-by-country review of the energy performance of buildings*, 2011; Per-Erik Josephson and Lasse Saukkoriipi, *Waste in construction projects: call for a new approach*, Chalmers University of Technology, 2007; Mark Hogan, *The Real Costs of Building Housing*, SPUR, 2014; Cushman & Wakefield Research Publication, *Office space across the world*, 2013; Ellen MacArthur Foundation, *Delivering the circular economy toolkit for policymakers*, 2015.

Fig.13 - Potenziali di crescita economica derivanti dall'applicazione del framework ReSOLVE per il settore delle costruzioni (Credits: Ellen MacArthur Foundation & McKinsey Center for Business and Environment (2015) *Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe*. [Online] Available at: <https://emf.thirdlight.com/link/8izw1qhtml4ga-404tsz/@/preview/1?o> (Accessed: 5th January 2022))

missione Europea, 2020a). La transizione dei processi edilizi in questa direzione richiede indubbiamente un profondo ripensamento nel modo di gestire i flussi di materia, e deve fare leva su nuovi approcci al progetto e alla realizzazione delle opere che consentano una gestione razionalizzata delle risorse. La macro-strategia che abilita l'efficiamento dei settori produttivi in chiave sostenibile è quella della digitalizzazione, ovvero sfruttare i potenziali delle tecnologie IT per incrementare la qualità dei processi, ottimizzare l'uso dei materiali, ridurre l'impiego di strumenti e supporti fisici e interconnettere la molteplicità di operatori e competenze coinvolte nella realizzazione delle opere (Fig.14). Il binomio che lega la transizione digitale a quella ecologica-circolare dei settori produttivi rappresenta il principio cardine della programmazione strategica comunitaria e nazionale per i prossimi anni; per questo motivo, il capitolo successivo ne analizza le implicazioni e i riferimenti normativi, delineando il contesto scientifico-tecnico di riferimento in cui opera oggi la produzione edilizia.

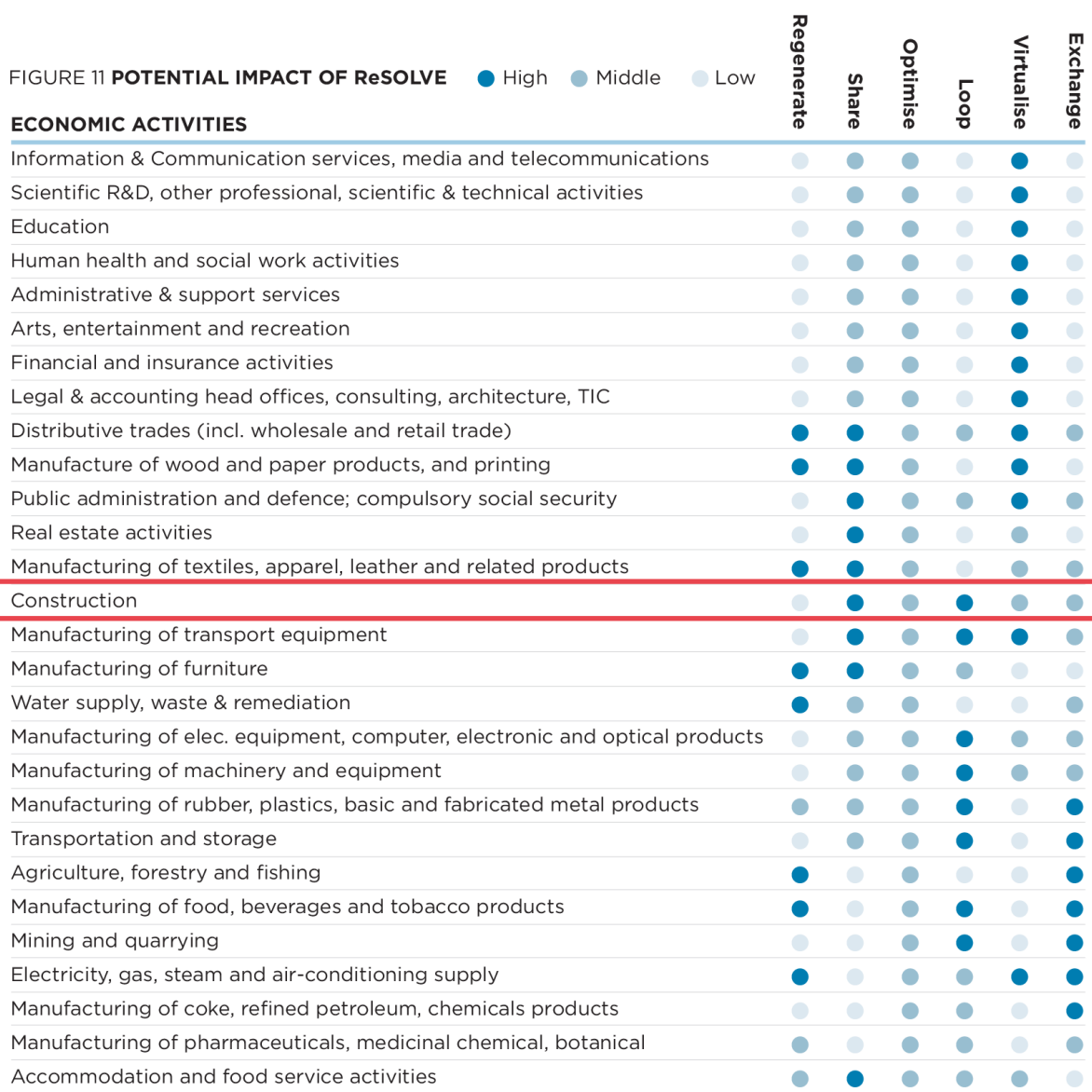


Fig.14 - Individuazione delle principali strategie da integrare nei processi edilizi per il potenziamento della competitività (Credits: © McKinsey & Company, 2016 da McKinsey Center for Business and Environment (2016) *The circular economy: Moving from theory to practice*. [Online] Available at: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business Functions/Sustainability/Our Insights/The circular economy Moving from theory to practice/The circular economy Moving from theory to practice.ashx> (Accessed: 5th January 2022))

1.5. La digitalizzazione del processo edilizio come *driver* della transizione ecologica del settore delle costruzioni

Le nuove organizzazioni dei modelli di produzione e consumo delle risorse, unite alle sempre più esigenti richieste di prestazione per gli edifici pubblici e privati, prospettano per il settore delle costruzioni un forte incremento della complessità dei processi edilizi. Il primo cambiamento riguarda la necessità di dover integrare il crescente numero di competenze ed attori che partecipano alla filiera, sia durante le fasi di selezione e approvvigionamento dei materiali, che in quelle di progettazione e cantierizzazione delle opere, fino alla gestione a fine vita. In secondo luogo, la molteplicità di discipline che convergono nel progetto contemporaneo richiede l'elaborazione di grandi quantitativi di informazioni, dati e documenti; ciò non solo in maniera funzionale alle verifiche normative, ma anche per coordinare, razionalizzare e ottimizzare le soluzioni tecnico-costruttive. In questa prospettiva, gli strumenti di programmazione indirizzati al comparto AEC stanno incoraggiando la dematerializzazione del processo edilizio, svincolandolo sempre di più dalle infrastrutture e strumenti fisici di supporto. La digitalizzazione, ovvero il passaggio a processi quanto più possibile "virtuali", si rivela un approccio essenziale per abilitare la trasformazione circolare e *green* degli assetti produttivi tradizionali, ed è alla base dei nuovi modelli di costruzione a impatto zero. A questo proposito, negli ultimi anni alcune ricerche scientifiche hanno infatti dimostrato come, attraverso l'informatizzazione dei processi, sia possibile ottenere una serie di benefici in ottica di sostenibilità (Qin *et al.*, 2016; Aghimien *et al.*, 2020) (Fig.15):

- **Miglior controllo della qualità dei prodotti e delle opere**, aumento della durabilità degli edifici e l'estensione del ciclo di vita utile;



Fig.15 - Aspetti di efficientamento dei processi edilizi derivanti dalle strategie di digitalizzazione (Credits: Elaborazione personale)

- **Velocizzazione delle operazioni di progetto e realizzazione**, con conseguente riduzione dei tempi e dei costi di realizzazione delle opere;
- **Riduzione del fabbisogno energetico** e della conseguente produzione di emissioni inquinanti lungo l'intero ciclo di vita degli edifici (progetto, realizzazione, uso, dismissione);
- **Limitazione degli sprechi** di materiale e riduzione dei rifiuti, che avviene sfruttando le capacità computazionali dei sistemi informatici per calcolare e ottimizzare le risorse necessarie alla produzione;
- **Fluidità dei flussi informativi e condivisione** delle risorse: attraverso le piattaforme di condivisione dati (come ad esempio il *cloud*), gli operatori del settore hanno la possibilità di accedere a “mercati virtuali” per approvvigionare risorse locali, verificare la disponibilità di componenti di riuso nelle vicinanze, mettere a disposizione materiali di scarto per altre filiere di produzione.

Da questo quadro risulta evidente come le potenzialità della digitalizzazione non solo convergano, sovrapponendosi, agli obiettivi di transizione verso l'economia circolare, ma anche come rappresentino la condizione indispensabile per la loro concreta e rapida attuazione. Per questo motivo, il *fil rouge* che accompagna la programmazione strategica comunitaria dei prossimi anni, e di conseguenza quella nazionale, è costituito dal binomio che lega la transizione ecologica a quella digitale. La Comunità Europea sta infatti sospingendo verso una sempre maggiore integrazione delle tecnologie ICT all'interno di tutti i settori produttivi, compreso quello delle costruzioni, interpretando la digitalizzazione come un mezzo strumentale per instaurare e accelerare la trasformazione ecologica degli assetti economico-produttivi e sociali. Alle tecnologie emergenti del settore ICT viene riconosciuto un ruolo cruciale nella decarbonizzazione dei settori produttivi, che avviene attraverso una migliore gestione delle catene di valori delle risorse materiali. A livello macroscopico, gli investimenti nel settore risultano dunque essenziali a raggiungere gli obiettivi del Green Deal, poiché aumentano la resilienza dell'economia comunitaria nei confronti delle sempre più frequenti crisi climatiche e umanitarie – non ultima l'emergenza pandemica legata al virus Covid-19 –, rafforzandone la competitività a livello globale (Commissione Europea, 2019a). Tale intento è chiarito nell'ambito dello **Strategic Plan 2021-2024**, il documento che accompagna i primi quattro anni del programma quadro di investimenti **Horizon Europe (2021-2027)**, definendone gli orientamenti strategici dei primi quattro anni. Il piano individua quattro Key Strategic Orientations for Research & Innovation (KSO); tra queste, la KSO-D ha come obiettivo “Rendere l'Europa la prima economia circolare, climaticamente neutra e sostenibile, abilitata al digitale attraverso la trasformazione dei suoi sistemi di mobilità, energia, costruzione e produzione”⁶. Gli obiettivi programmatici dell'Europa per i prossimi anni investono direttamente anche il comparto edile, per il quale vengono stanziati specifiche linee di finanziamento. In particolare, il tema ricade nel campo di azione del Pillar II, Global Challenges and Industrial Competitiveness, e più precisamente nei due Cluster (Fig.16):



6. Trad. “Making Europe the first digitally enabled circular, climate-neutral and sustainable economy through the transformation of its mobility, energy, construction and production systems”.

- **Cluster 4: Digital, Industry and Space**, che finanzia progetti che hanno l’obiettivo di costruire modelli produttivi competitivi, digitalizzati e circolari, attraverso una gestione sostenibile delle fonti di approvvigionamento delle risorse e l’uso e/o lo sviluppo di materiali innovativi, altamente performanti e a ridotto impatto ambientale. Tra le prime Call lanciate nell’ambito del Cluster 4 si cita per esempio il bando “Twin Green and Digital Transition 2021” (HORIZON-CL4-2021-TWIN-TRANSITION-01), che si propone di sostenere azioni coordinate tra centri di ricerca e aziende (in particolare PMI) per lo sviluppo di progetti che, sfruttando i potenziali delle tecnologie IT, riescano ad implementare strumenti di supporto ad una produzione *smart*, ecologica ed efficiente sotto il profilo delle risorse;
- **Cluster 5: Climate, Energy and Mobility**, in particolare con la Mission Area: *Climate-neutral and smart cities*, che contiene gli strumenti finanziari di supporto agli obiettivi trans-nazionali di neutralità climatica attraverso incentivi a progetti ad elevato contenuto di innovazione tecnologica che trasformino gli insediamenti urbani in eco-sistemi interconnessi, ad elevata efficienza e ridotto impatto ambientale (Commissione Europea, 2018).



Fig.16 - Struttura del Programma Quadro Horizon Europe 2021-2027: individuazione dei Cluster di riferimento per il settore AEC (Credits: Commissione Europea)

Contemporaneamente, la programmazione di Horizon Europe si pone in relazione diretta con i contenuti delle Comunicazioni COM(2020) 102 *Una nuova strategia industriale per l'Europa* e COM(2020) 103 *Una strategia per le Piccole e Medie Imprese (PMI) per un'Europa sostenibile e digitale*. L'intento dichiarato dalle due Comunicazioni è infatti quello di guidare la transizione dei settori produttivi, tra cui quello edile, verso modelli a impatto climatico zero, impiegando la digitalizzazione e l'uso di sistemi IT per rendere possibili nuove organizzazioni intelligenti delle filiere, improntate a modelli circolari ed ecologici. In questo contesto, una particolare attenzione è rivolta alle PMI che, costituendo gran parte del tessuto produttivo europeo, rivestono il ruolo di motore trainante della rivoluzione digitale e circolare voluta dall'UE. La strategia industriale ribadisce inoltre la necessità di miglioramento delle prestazioni ambientali dei manufatti edili e dei prodotti da costruzione, sottolineando che un ambiente edificato più sostenibile sarà essenziale per la transizione dell'Europa verso la neutralità climatica (COM(2020) 102), p.8).

La centralità del ruolo dei comparti produttivi privati nell'indirizzare la transizione ecologica dell'Unione è chiarita, per esempio, negli intenti del programma **Processes4Planet**, un programma di *partnership* tra l'**Associazione Europea A.SPIRE** e i principali attori industriali che mira a sostenere processi di innovazione per ridurre l'impatto ambientale delle maggiori filiere produttive come acciaio, ceramica, calcestruzzo e carta. La missione del programma è quello di assicurare lo sviluppo su larga scala di tecnologie che valorizzino le risorse delle catene produttive industriali, efficientando i processi e riducendone i potenziali di impatto ambientale.



In Italia, gli indirizzi comunitari trovano corrispondenza nei contenuti del recente **Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)**, un piano nazionale di investimenti da 248 miliardi di euro, da impiegare nel quinquennio 2021-26 per la risposta alla crisi pandemica. Lo strumento beneficia del **Dispositivo per la Ripresa e Resilienza (RRF)** messo a disposizione dall'Unione Europea nell'ambito del programma **Next Generation EU (NG-EU)**, e si articola in sei Missioni. Tra queste, la **Missione 1: Digitalizzazione, Innovazione, Competitività, Cultura e Turismo**, tramite la **Componente 2: Digitalizzazione, Innovazione e Competitività del Sistema Produttivo** intende "favorire la transizione digitale e l'innovazione del sistema produttivo incentivando gli investimenti in tecnologie avanzate, ricerca e innovazione" (Ministero delle Economie e delle Finanze, 2021, p. 269). La Missione prevede inoltre un investimento di 13.38 miliardi di euro nel Piano Transizione 4.0 (MISE) che stanziava misure di sostegno alle aziende tramite credito d'imposta per stimolare gli investimenti in beni strumentali, il finanziamento di azioni di ricerca, sviluppo e innovazione tecnologica. All'interno del PNRR la **Missione 2: Rivoluzione Verde e Transizione Ecologica**, indirizza invece le problematiche ambientali attraverso un pacchetto di investimenti rivolto alla trasformazione ecologica e all'efficientamento energetico del sistema costruito. Ciò avviene in attuazione diretta e attraverso i fondi del NG-EU, che riserva il 30% del totale dei fondi europei (750 miliardi) alla lotta ai cambiamenti climatici (Ministero delle Economie e delle Finanze, 2021).

A livello operativo, l'attuazione delle strategie comunitarie e nazionali in tema di transizione *green*/digitale del settore delle costruzioni passa attraverso un insieme di Direttive e normative che, negli ultimi anni, sono state emanate al fine di promuovere l'uso di strumenti informatizzati per la gestione dei processi edilizi, con l'obiettivo di correggerne le cause di inefficienza e incrementare la qualità delle opere (in particolare quelle pubbliche). Le normative fanno leva su un approccio progettuale-gestionale basato sul **Buiding Information Modelling (BIM)**, una metodologia di sviluppo dei progetti basata su piattaforme digitali interoperabili e collaborative, che consentono di modellare contemporaneamente un edificio nelle sue caratteristiche fisiche, funzionali e prestazionali (Merschbrock e Munkvold, 2012). Si tratta di una progettazione integrata, basata su un modello digitalizzato aperto dell'edificio, che sfrutta le capacità computazionali delle tecnologie digitali per accelerare le fasi di design/co-design e verifica normativa (*Code Checking*), di aggiornamento dei documenti, di controllo delle interferenze (*Clash detection*), di computo (BIM 5D) e pianificazione delle attività di cantiere (BIM 4D, *BIM-to-field*) (Galluccio, 2019) (Fig.17). Come si approfondirà in seguito, i benefici dell'adozione della metodologia BIM nel processo edilizio sono molteplici, e riguardano tra gli altri il miglioramento dell'efficienza dei processi, della capacità di controllo e verifica delle prestazioni, l'ottimizzazione dei tempi e dei costi di realizzazione delle opere, l'inclusione e la collaborazione tra i diversi attori coinvolti nel processo edilizio.



Fig.17 - Aspetti gestionali e fasi del processo edilizio coinvolte dalla metodologia BIM (Credits: Elaborazione personale)

Per questi motivi, l'adozione dell'approccio BIM per i processi edilizi è stata sostenuta dall'ordinamento legislativo promosso con la riforma degli appalti, attuata a partire proprio dal presupposto della digitalizzazione. La riforma è stata avviata il 15 gennaio 2014 con l'approvazione della **European Union Public Procurement Directive (EUPPD, Direttiva 2014/24/UE)**, che raccomandava agli stati membri l'emanazione di regolamenti e/o normative per incoraggiare, specificare o imporre l'uso di metodi informatizzati nella gestione di progetti di edilizia pubblica finanziati, a partire dal 2016, con fondi comunitari. La EUPPD, prendendo a riferimento alcune esperienze avviate positivamente in Paesi come Norvegia, Finlandia, Paesi Bassi e Danimarca, ha richiesto agli Stati membri di favorire l'integrazione di

approcci e metodologie BIM per incrementare le possibilità di controllo, da parte delle PA, della qualità delle diverse fasi dei processi edilizi – dalla progettazione e verifica, all’uso e manutenzione degli edifici, fino alla successiva gestione a fine vita dei manufatti, assicurando contemporaneamente la certezza di tempi e costi di intervento.

In Italia, la Direttiva è stata recepita a partire dal 28 febbraio 2016 con la **Legge n.11, *Deleghe al Governo per l’attuazione delle Direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE, 2014/25 UE del 26 febbraio 2014*** che all’art.1 ha introdotto l’obbligo per le stazioni appaltanti di “pervenire alla valorizzazione della fase progettuale [...] anche attraverso il progressivo uso di metodi e strumenti elettronici specifici quali quelli di modellazione elettronica”. Lo stesso anno, sempre in recepimento della EUPPD, il D.Lgs. del 18 aprile 2016 n.50 ha invitato alla predisposizione di sistemi di monitoraggio per i lavori pubblici, dando facoltà alle stazioni appaltanti di “richiedere l’uso di metodi e strumenti elettronici specifici che utilizzano piattaforme interoperabili a mezzo di formati aperti non proprietari per garantire l’ottenimento di determinati standard di qualità prefissati”. In seguito, il D.M. 1° dicembre 2017 n.560 ha stabilito le “modalità e i tempi di progressiva introduzione, da parte delle stazioni appaltanti [...] dell’obbligatorietà dei metodi e degli strumenti elettronici specifici per la gestione dei processi edilizi”. Operativamente, il decreto traccia progressivamente i riferimenti temporali e le soglie di importo economico rispetto alle quali introdurre l’obbligo di adozione di strumenti di modellazione digitalizzata dei progetti. Nello specifico, all’art.6 viene stabilito che dal 1° gennaio 2025 l’approccio gestionale BIM sarà reso obbligatorio per tutti i progetti di edilizia pubblica.

Gli indirizzi della programmazione strategica comunitaria e nazionale prospettano, per il comparto AEC, un futuro all’insegna di profondi cambiamenti di approccio, metodi e strumenti. Una trasformazione richiesta dall’improponibilità delle questioni ambientali in atto, che impone a tutti i settori economici di rivedere i propri modelli di sviluppo in una chiave di resilienza e sostenibilità ambientale. Per gli operatori economici privati che operano nel settore della produzione edilizia, tale quadro strategico apre la strada a opportunità di innovazione basate sui principi della circolarità e digitalizzazione, indirizzate all’obiettivo operativo di incrementare la qualità dei prodotti e dei processi edilizi. A partire dall’inquadramento generale, si è inteso investigare i nuovi paradigmi di riferimento per il settore della produzione edilizia inquadrando in un campo di applicazione che presenta elevati potenziali per accogliere e testare i contributi di innovazione sul tema, ovvero quello dell’edilizia scolastica. La scelta è giustificata dall’osservare che negli ultimi anni molti stati europei, tra cui anche l’Italia, hanno avviato programmi per il potenziamento della qualità e quantità di infrastrutture per l’educazione, anche in conseguenza del profondo stato di vulnerabilità in cui si trova il patrimonio edilizio scolastico costruito nella seconda metà del secolo scorso. Quello dell’edilizia scolastica rappresenta un settore di intervento in forte crescita, e può rappresentare un interessante campo di prova per trainare la transizione ecologica-digitale del settore edilizio. Con l’obiettivo di mappare lo stato di fatto del patrimonio edilizio scolastico, in ambito nazionale ed estero, il capitolo successivo ricostruisce il quadro scientifico e normativo di riferimento sul tema dell’edilizia scolastica.



I.2 Edilizia scolastica: un campo di prova per testare i paradigmi di innovazione del processo edilizio

2.1. Lo stato di fatto delle infrastrutture per l'educazione

La scuola è il luogo in cui si realizza un diritto inalienabile di tutti gli esseri umani, ovvero l'educazione e formazione culturale e professionale. L'accesso a forme adeguate di istruzione scolastica rappresenta, nel diritto internazionale, la condizione essenziale a indirizzare il progresso socio-economico delle nazioni. Ciononostante, le infrastrutture destinate ad accogliere le funzioni educative attualmente manifestano una serie di problematiche e vulnerabilità che compromettono la possibilità di forme di educazione appropriate. L'Organizzazione delle Nazioni Unite (ONU) stima infatti che, nel mondo, 262 milioni di bambini non abbiano accesso all'educazione scolastica, e che il 55% della popolazione in età scolare manchi di una adeguata alfabetizzazione e di competenze matematiche di base (ONU, 2020). A livello macroscopico, la situazione è indubbiamente il prodotto di un complesso rapporto di causalità ed effetto tra condizioni politiche, ambientali e socio-economiche; tuttavia, inquadrando il problema a scala locale, il mancato accesso all'istruzione si può ricondurre anche ad aspetti di carattere infrastrutturale, e nello specifico alla generale inefficacia delle dotazioni scolastiche esistenti.

In primo luogo, il problema si lega ad una **scarsità – in termini strettamente quantitativi – di infrastrutture scolastiche**. Si tratta di una carenza che affligge principalmente i paesi in via di sviluppo, con le condizioni più estreme nell'Africa Sub-sahariana e nell'Asia centro-meridionale. Qui si concentra attualmente il 50% della popolazione mondiale in età scolastica che non ha accesso all'istruzione, e si stima che il tasso di alfabetizzazione raggiunga a malapena il 20% (Matshipi *et al.*, 2017). L'Africa in particolar modo affronta una crisi severa nel fornire attrezzature di base, con situazioni particolarmente preoccupanti per la scuola primaria e secondaria di primo grado. In questo caso, i dati mostrano che meno della metà delle scuole governative è dotata di servizi essenziali come acqua potabile ed elettricità, oltre che di strumenti quali computer e accesso a internet (ONU, 2020b). Una situazione analoga si manifesta in India, dove addirittura l'89% delle scuole risulta priva di servizi igienici. Questo avviene comunque a fronte di rette scolastiche elevate, insostenibili per famiglie che versano perlopiù in condizioni di indigenza; la soluzione che le famiglie adottano più frequentemente è quella di ricorrere a forme alternative di istruzione, in scuole non registrate e allestite nelle abitazioni private, che richiedono minori costi di iscrizione ma che promuovono una scarsa qualità dell'insegnamento e degli ambienti di apprendimento (Tooley *et al.*, 2005).

Nei paesi industrializzati, e in particolare nelle grandi città, le carenze quantitative delle infrastrutture scolastiche sono da leggersi invece rispetto alla mancanza di spazi negli edifici esistenti (Fig.19), una criticità che, a sua volta, deriva dalla crescita demografica generata dall'effetto combinato dell'aumento della popolazione e dallo spostamento interno verso i maggiori agglomerati urbani (Salmi *et al.*, 2017). L'effetto è una pressione crescente sugli edifici sco-



Fig.19 - Nella scuola di Lu'an, nella provincia di Anhui, si è registrato uno dei più alti tassi di sovrappollamento scolastico, contando fino a 113 alunni per classe (Credits: © Wu Fang/VCG, 2012 da www.sixthtone.com)

lastici, che non dispongono di spazi sufficienti per far fronte alle iscrizioni annuali; la situazione è inoltre esacerbata dalle politiche scolastiche degli ultimi anni che, riducendo il numero di studenti per sezione, hanno fatto aumentare il numero delle classi negli istituti scolastici, che hanno dovuto far fronte ad una domanda progressiva di nuovi spazi in cui ospitare le attività didattiche.

A titolo di esempio, nello Stato del New South Wales (NSW) in Australia, negli ultimi decenni l'aumento dei tassi di natalità e dei flussi migratori interni ha provocato una crescita esponenziale nel numero di studenti in ingresso nelle scuole, con un aumento atteso per i prossimi 20 anni da 1.2 a 1.5 milioni (+25%). Di questi, più dell'80% si concentra nell'area metropolitana di Sydney, dove saranno necessari 6500 nuovi posti per accogliere gli studenti (NSW State, 2018). Nel 2018, un'inchiesta del quotidiano Sydney Morning Herald ha calcolato che almeno 10 aree sotto la giurisdizione della città stavano già subendo un aumento progressivo della popolazione in età scolare, che si prevede incrementerà di un ulteriore 67% entro il 2030 (+9600 studenti). La situazione attuale genera una forte pressione sugli edifici scolastici e lo stesso ex-Ministro dell'Educazione Rob Stokes ha dichiarato, a tale proposito, che *almeno il 37% delle scuole è ad oggi completamente utilizzato, mentre il 5% ha un numero di studenti superiore alle proprie capacità* (The Sydney Morning Herald, 2018).

Un caso analogo è quello degli Stati Uniti, in cui gran parte delle scuole, ed in particolare nei grandi agglomerati urbani, è affetta da fenomeni di sovrappollamento e carenze di spazio; una situazione che rischia di aggravarsi ulteriormente in vista delle stime per l'anno 2027, che prospettano un ulteriore incremento del 4% della popolazione in età scolastica (NCES, 2019).

Allo stesso modo, anche la Cina negli ultimi decenni ha registrato un'espansione massiva del sistema scolastico, e sia dell'incremento demografico che delle riforme didattiche introdotte dagli anni '70, che alzavano l'età minima per l'obbligatorietà dell'istruzione; una condizione emergenziale che suscita preoccupazioni crescenti non solo sulla tenuta delle infrastrutture educative, ma anche sull'uguaglianza di opportunità tra chi vive nelle grandi città e nelle aree periferiche (Gruijters *et al.*, 2019).

In Europa, una condizione altrettanto critica si manifesta per esempio nel Regno Unito, la domanda di nuovi edifici scolastici risulta sempre più urgente in considerazione del rapido aumento demografico e urbanizzazione di alcune aree del paese. Le ricerche stimano infatti che almeno una scuola su cinque stia attualmente lavorando oltre le proprie capacità di affollamento, spesso sacrificando spazi comuni come biblioteche e laboratori, per lo svolgimento delle lezioni (RIBA, 2014). Ad aggravare il quadro, un'indagine condotta nel 2019 profilava, per l'anno accademico 2020-2021, un aumento di 385.000 studenti (+5.5%) nella sola Inghilterra, con un fabbisogno stimato di 640 nuove scuole e 12.800 aule. Si tratta tra l'altro di un'emergenza che può contare su ridotte risorse economico-finanziarie, dal momento che il 2020 ha visto una ulteriore riduzione dei fondi a disposizione degli interventi per l'edilizia scolastica (-4.6% rispetto all'anno precedente) (The Scape Group, 2019).

Una ulteriore condizione di inefficacia si lega allo stato di **generalizzata inadeguatezza funzionale del patrimonio edilizio scolastico**, ovvero alla necessità di approntare urgenti e profondi interventi di manutenzione e riqualificazione. Lo scenario riguarda l'Italia da vicino; nel corso degli anni '60-80 del Novecento, il boom demografico ha richiesto un rapido incremento del parco scuole, arrivando a costruire fino a 800 scuole ad anno. Un'espansione che è però avvenuta a scapito della qualità degli edifici, che erano piuttosto realizzati in funzione di principi di economicità e rapidità di costruzione (Antonini *et al.*, 2015). Quello che ne perviene oggi è un patrimonio edilizio con qualità costruttive inadeguate rispetto alle esigenze dell'utenza, oltre che insalubri e insicuri per l'utenza, spesso a rischio di crolli e incidenti (Cittadinanzattiva, 2018) (Fig.20). Il quadro che si presenta risente anche della vetustà degli edifici; l'età media delle scuole italiane è di 52 anni, con il 63.6% delle strutture realizzate prima del 1974, anno dell'entrata in vigore della normativa antisismica. Ciò comporta una profonda vulnerabilità degli edifici, soprattutto se si considera che 3 scuole su 4 sono localizzate in aree a rischio sismico, e che solo il 53.7% è dotato di certificato di collaudo statico (Legambiente, 2018a). Per far fronte a tale situazione, nel 2003 l'OPCM 3274/2003¹ ha introdotto l'obbligo per le PA di procedere alle verifiche di vulnerabilità sismica di tutti gli edifici scolastici. Un'operazione che, seppur necessaria nei suoi intenti, ha generato un ulteriore stato di emergenza, portando di frequente alla chiusura di tutte quelle scuole che riportavano un esito negativo delle verifiche di sicurezza antisismica, con la conseguenza di dover rintracciare spazi alternativi in cui ospitare gli studenti per proseguire le attività didattiche. Parallelamente alle criticità strutturali, l'affermarsi di nuove modalità di insegnamento ha determinato un ulteriore stato di obsolescenza funzionale degli edifici scolastici esistenti. Negli ultimi anni infatti, i fattori di cambiamento delle metodologie didattiche hanno portato all'affermazione di nuovi modelli pedagogici e didattici, che richiedono un'organizzazione fluida e flessibile dei *layout* spaziali; una necessità in netto contrasto rispetto ai rigidi schemi tipologici che caratterizzano la maggioranza delle scuole esistenti, che risultano ormai funzionalmente obsolete per accogliere i programmi pedagogici (Fondazione Agnelli, 2019).

1. L'Ordinanza 3274/2003 ha introdotto l'obbligo, per i proprietari di edifici che rivestono interesse strategico in caso di eventi sismici – tra cui gli edifici scolastici –, di procedere alle verifiche di vulnerabilità sismica, secondo scadenze temporali diversificate in relazione alla zona di rischio in cui ricadono gli edifici. Dall'emanazione del Decreto, le scadenze temporali sono state progressivamente ampliate, anche in considerazione del ritardo con cui le pubbliche amministrazioni hanno proceduto alle verifiche. Per le zone di rischio 1 e 2 (rischio maggiore), i termini ultimi per le verifiche di pericolosità sono scaduti il 31 dicembre 2018, e attualmente sono in corso le verifiche su edifici ricadenti in zona 3 e 4 (minore rischio sismico). In caso di esito negativo della verifica di sicurezza antisismica, spetta ai Prefetti, nel ruolo di rappresentanti territoriali del Governo e dei Sindaci, la competenza a disporre della chiusura della scuola in considerazione del potenziale pericolo per la sicurezza e l'incolumità degli utenti.

Crolla un controsoffitto: scuola chiusa a Rodigo

Rita Lafelli, 6 novembre 2021 - Gazzetta di Mantova

Carmagnola, crolla controsoffitto a scuola: un ferito
20 dicembre 2021 - SkyTg24

Quarto, crollo calcinacci dall'ex cinema: chiusa la scuola Viviani
Ferdinando Bocchetti, 23 novembre 2021 - Il Mattino

Gaeta. Crolla il controsoffitto al Nautico: scuola chiusa, "sfrattate" 7 classi
1 dicembre 2021 - il Faro

Scuola: 50 episodi di crollo nell'ultimo anno
20 novembre 2020 - ANSA

Crolla il tetto del liceo Boggio Lera: nessun ferito ma evacuata la scuola
Ferdinando Bocchetti, 17 gennaio 2022 - CataniaToday

Fig.20 - La vulnerabilità delle infrastrutture scolastiche italiane è testimoniata anche dai titoli di cronaca che riportano frequenti incidenti e crolli avvenuti nelle scuole (Credits: Elaborazione personale)

Per correggere il grave stato di inadeguatezza che affligge il patrimonio edilizio scolastico nazionale, il piano di investimenti previsto dal PNRR ha destinato un pacchetto di finanziamenti a sostegno degli interventi di riqualificazione e rifunionalizzazione delle infrastrutture per l'educazione, inaugurando una stagione di profondo rinnovamento dell'edilizia scolastica nazionale. In particolare, le opere sull'edilizia scolastica sono ricomprese nella Missione 4 – Istruzione e Ricerca con la Componente 1 – Potenziamento dell'offerta dei servizi all'istruzione: dagli asili nido alle università che, attraverso l'ambito di intervento 3. Ampliamento delle competenze e miglioramento delle infrastrutture, mette a disposizione 2.10 Mld € nell'investimento 3.2. Scuola 4.0: Scuole innovative, nuove aule didattiche e laboratori (Ministero delle Economie e delle Finanze, 2021).

Lo scenario italiano riflette comunque una problematica di ampia portata in molti paesi occidentali come Canada, Cina, Stati Uniti e Gran Bretagna, realtà in cui gran parte del patrimonio edilizio scolastico risulta affetto da vulnerabilità strutturali e fenomeni di degrado diffusi (Alexander *et al.*, 2015). Per esempio, in Gran Bretagna l'80% degli edifici ha superato il proprio ciclo di vita utile, e una parte significativa del patrimonio scolastico risulta scarsamente mantenuto, esponendo studenti e insegnanti a potenziali pericoli ambientali e strutturali (RIBA, 2014). Analogamente, si calcola che negli Stati Uniti circa 14 milioni di studenti frequentino scuole in cui sono presenti rischi ambientali, in particolare la presenza di sostanze inquinanti e VOCs (*Volatile Organic Compounds*) nell'aria, che generano problemi sulla salute di quasi la metà degli studenti (Wakefield, 2002).

La profonda vulnerabilità funzionale e strutturale degli edifici richiama anche questioni legate alla **sicurezza e resilienza nei confronti di emergenze legate a disastri naturale e/o antropici**, come terremoti (Fig.21), alluvioni, tsunami, migrazioni climatiche e conflitti, emergenze demografiche e sanitarie.

Per quanto riguarda le catastrofi ambientali, recenti studi hanno dimostrato come negli ultimi 50 anni vi siano stati cambiamenti climatici senza precedenti (Coronese *et al.*, 2019), prevalentemente associati ad un aumento delle emissioni di inquinanti e gas serra, che hanno generato un severo inasprimento della frequenza e intensità con cui si verificano fenomeni naturali catastrofici. Le ricadute sui sistemi infrastrutturali scolastici sono molteplici, e riguardano (Cadag *et al.*, 2017; Nakanishi e Black, 2016):



Fig.21 - Il crollo della Scuola Jovine di San Giuliano di Puglia (2002) a seguito del sisma in Molise testimonia la profonda vulnerabilità delle strutture scolastiche nei confronti di eventi naturali catastrofici (Credits: www.primopianomolise.it)

- La distruzione totale o parziale degli edifici scolastici;
- La perdita delle infrastrutture necessarie a raggiungere le scuole, con difficoltà da parte degli studenti di raggiungerle, soprattutto nei paesi in via di sviluppo (Sud-est asiatico, Sudamerica);
- La difficoltà di raggiungere le scuole a seguito del ricollocamento in aree di ricovero lontane delle scuole;
- L'indisponibilità delle strutture scolastiche, che devono essere usate come *shelter* provvisori per la comunità;
- La perdita di materiali e attrezzature didattiche, che spesso non riescono ad essere salvati dalle scuole e/o dalle abitazioni.

Le ricadute sul percorso educativo sono estremamente significative e talvolta irreversibili, e variano da un calo del rendimento scolastico fino all'abbandono del percorso di studi. A questo proposito, nel 2008 uno studio condotto negli Stati Uniti ha documentato le conseguenze sul percorso scolastico degli studenti colpiti dall'uragano Katrina. I dati forniti dalle scuole pubbliche della Louisiana hanno permesso di evidenziare una decisiva contrazione nel numero di iscrizioni a scuola, un aumento del tasso di assenteismo e di abbandono scolastico, nonché un frequente manifestarsi di problematiche comportamentali tra gli studenti, con effetti più marcati tra quelli che avevano subito il ricollocamento per tutta la durata dell'anno scolastico (Pane *et al.*, 2008).

Uno scenario ugualmente preoccupante è quello legato alle **crisi umanitarie**, ovvero a migrazioni e condizioni di sfollamento indotte da mutamenti climatici e conflitti. Nel primo caso, si tratta di movimenti di popolazione causati dall'estremizzazione delle condizioni ambientali in alcune aree del pianeta (desertificazione, siccità, innalzamento del livello dei mari). Per comprendere la portata del fenomeno, nel 2018 uno studio della World Bank (Rigaud *et al.*, 2018) ha delineato uno scenario al 2050 in cui, a meno di concrete misure di intervento, circa 143 milioni di persone saranno costrette a migrare per sfuggire alle lente ma progressive ricadute del cambiamento climatico. A questo proposito, è importante inoltre notare come, già adesso, circa l'80% della popolazione sfollata nel mondo (47.5 milioni di persone in totale) provenga da luoghi resi inospitali da condizioni ambientali estreme ed affetti per questo da carestie e malnutrizione (UNHCR, 2020). Per quanto riguarda invece la crisi umanitaria legata a guerre e conflitti, si tratta di una condizione che, secondo Filippo Grandi, UN High Commissioner for Refugees, oggi è più vasta e diffusa che mai, e

non può più essere considerata come un fenomeno temporaneo. L'UNHCR stima che, solo nel 2018, 25 persone ogni minuto sono state costrette ad abbandonare la propria casa perché minacciate da guerre e conflitti (UNHCR, 2020). Gli effetti di tali emergenze colpiscono in maniera diretta le nuove generazioni, dal momento che si stima che un bambino che ad oggi si trovi in una condizione di sfollamento abbia 5 volte più probabilità di non frequentare un percorso scolastico (UNHCR, 2016). I dati trovano riscontro nelle statistiche dell'ONU, secondo cui il 50% della popolazione non alfabetizzata in età scolare proviene da aree di conflitto (ONU, 2015). In Giordania per esempio, uno dei paesi più coinvolti nell'emergenza umanitaria causata dalla guerra in Siria, attualmente trovano rifugio circa 220'000 ragazzi di età compresa tra 5 e 17 anni, ma di questi solo il 53% risulta iscritto a scuola. Il limite maggiore è rappresentato dalla mancanza di infrastrutture scolastiche, che costringe gli studenti a svolgere le lezioni in più turni giornalieri, con un generale abbassamento della qualità della loro istruzione e/o l'abbandono precoce del percorso scolastico (Kubow, 2019).

Ad aggravare il quadro, negli ultimi due anni l'**emergenza sanitaria provocata dalla pandemia del virus Covid-19** ha portato in luce la fragilità delle strutture economiche, sociali e ambientali globali, provocando profonde ricadute anche per le nuove generazioni e rischiando di comprometterne le possibilità di crescita e formazione. Innanzi tutto perché la crisi sanitaria ha richiesto di erogare il 90% delle attività didattiche a distanza, seppure circa 500 milioni di studenti non avessero la possibilità di accedervi per mancanza di dotazioni e strumenti personali (ONU, 2020a), con il rischio, soprattutto nei paesi in via di sviluppo, di abbandono o di grave ritardo nel percorso formativo (Fig.22).



Fig.22 - La recente installazione *Pandemic Classroom* di UNICEF di fronte all'Ufficio delle Nazioni Unite a New York solleva l'attenzione sull'impatto generato dalla pandemia Covid-19 sull'apprendimento scolastico (Credits: © UNICEF/UN0423776/Chris Farber/UNICEF via Getty Images)

In Italia inoltre, la ripresa delle attività didattiche si è dovuta scontrare con il già citato stato di inadeguatezza funzionale degli edifici scolastici. In alcuni casi, garantire le misure di sicurezza previste per il rientro in aula è stato possibile solo attraverso l'ampliamento delle aule per assicurare il rispetto del distanziamento interpersonale. La ripresa delle attività, avvenuta prima a Settembre 2020 e poi a Maggio 2021, ha richiesto la predisposizione di numerosi interventi correttivi sugli edifici (ampliamenti delle aule, demolizioni selettive), che hanno di contro generato una domanda per spazi aggiuntivi. A Milano per esempio, una delle città italiane più colpite dalla crisi epidemiologica, l'Assessore all'Edilizia Scolastica Paolo Limonta, durante una conferenza stampa del Giugno 2020, dichiarava che alla riapertura delle scuole il Comune avrebbe necessitato del 20% in più di spazi scolastici, a fronte della necessità di ampliare le aule esistenti per ospitare le lezioni in sicurezza (*La scuola dopo il Covid, a Milano le aule non bastano: "Serve almeno il 20% di spazio in più"*, 2020).

Quello legato alla crisi pandemica è dunque l'ennesimo degli scenari con cui si confrontano oggi le politiche e i programmi di supporto al diritto all'istruzione. Scenari in cui si evidenziano le gravi carenze infrastrutturali del patrimonio edilizio scolastico perché, pur dovendo accogliere le azioni dei programmi di sviluppo internazionali, le infrastrutture globali – seppur per cause diversificate – risultano pericolosamente vulnerabili nei confronti di potenziali pericoli ambientali e/o antropici, oltre a risentire di condizioni di marginalità territoriale e disfunzionalità spaziale. In particolare, l'analisi dello stato di fatto degli edifici evidenzia, sia a livello nazionale che internazionale, una generalizzata inefficacia delle strutture nella risposta alle esigenze di corretta accessibilità e fruibilità degli spazi, sia in termini quantitativi (scarsità di aule, mancanza di scuole in territori marginali) che qualitativi (mancanza di servizi di base, qualità ambientale e spaziale non adeguata alle istanze pedagogiche). Rispetto al quadro di problematiche che si prospetta, le politiche di programmazione si stanno muovendo con azioni rivolte al potenziamento delle dotazioni infrastrutturali scolastiche, mirate al potenziamento dell'offerta e della qualità degli spazi per l'apprendimento.

In questo contesto, alle discipline dell'architettura è richiesto di promuovere soluzioni tecnico-costruttive in grado di rispondere alla molteplicità di istanze in gioco, mediando la qualità delle opere con le esigenze connesse alla connotazione *emergenziale* richiamata dall'urgenza degli interventi e dalla fragilità dei contesti in cui questi si inseriscono. La mancanza di infrastrutture scolastiche adeguate e il mancato accesso all'istruzione da parte di milioni di studenti nel mondo, la perdita del patrimonio edilizio causata da eventi naturali catastrofici, così come la riprogrammazione imposta dalla recente crisi sanitaria, rappresentano infatti circostanze di difficoltà urgenti- talvolta difficilmente prevedibili- che necessitano di una risposta rapida, capace di ottimizzare le risorse a disposizione per assicurare la vivibilità e l'appropriatezza degli spazi di apprendimento, nonché di rispondere ai criteri di sostenibilità richiesti per la realizzazione delle opere pubbliche.

2.2. Apprendere nell'emergenza: problematiche e questioni aperte

Frequentare un percorso scolastico in una condizione di emergenza significa, per studenti e insegnanti, adattarsi a fruire di edifici precari, spesso insalubri e poveri – se non privi – di stimoli educativi. Raramente le soluzioni messe in atto per fronteggiare le urgenze di accessibilità delle scuole sono propriamente progettate. Si tratta piuttosto di sistemazioni precarie, ricercate nell'improrogabilità del dare risposta ad una situazione che genera apprensione e preoccupazione per genitori, docenti e alunni. In condizioni di transitorietà come il post-disastro o la riqualificazione di edifici esistenti, la strategia che prioritariamente viene messa in campo consiste nel ricollocare gli studenti in altri spazi o edifici, talvolta funzionalmente riconvertiti e/o adattati quando non immediatamente fruibili per le funzioni scolastiche. Si tratta di soluzioni che però richiedono un insieme di misure di programmazione (individuazione degli immobili, predisposizione delle opere di sistemazione, organizzazione dei trasporti) che non solo esauriscono una parte delle risorse a disposizione degli interventi, ma che prolungano – soprattutto quando non previste – la permanenza in una condizione di incertezza e di inaccessibilità dei servizi scolastici. È inoltre importante osservare che quando gli spazi vengono reperiti riconvertendo biblioteche, laboratori e atri, si sacrificano luoghi e funzioni essenziali ad un corretto percorso di apprendimento, con un conseguente impoverimento dei programmi didattici, per i quali tali spazi costituiscono parte integrante della formazione dell'alunno.

La soluzione alternativa, adottata anche in caso di sovraffollamento e/o realizzazione di scuole in territori marginali, è la predisposizione di nuovi spazi "di emergenza", spesso approntati anche in prossimità di quelli esistenti. Gli interventi in questo caso devono prevedere modalità realizzative tali da assecondare una transitorietà d'uso di medio-lungo periodo, rispondendo ad esigenze molteplici: rapidità e bassi costi di realizzazione, facilità di messa in opera, ma anche vivibilità dei manufatti, qualità spaziale, ambientale e comfort per l'utenza. Ciononostante, nell'ambito di questa strategia, la prassi operativa – perciò la domanda da parte del settore pubblico e l'offerta degli operatori economici privati –, si è progressivamente consolidata sull'utilizzo di soluzioni pre-assemblate (unità container) che promuovono standard minimi di qualità tecnico-costruttiva e vivibilità degli spazi. Già da molti anni, tali soluzioni sono oggetto di critiche da parte degli utenti (studenti, insegnanti, genitori) e della comunità scientifica rispetto alla loro appropriatezza (Fig.23). Le principali preoccupazioni riguardano la precarietà delle condizioni di uso degli spazi, che promuovono sub-standard qualitativi, spazi monotoni e funzionalmente inefficaci, oltre che prestazioni ambientali (illuminazione naturale, qualità dell'aria, ventilazione) inadeguate per l'utenza e le attività che accolgono. A partire dagli anni Novanta, tali problematiche sono state confermate anche dalla comunità scientifica internazionale, attraverso una serie di studi che hanno monitorato le condizioni di apprendimento degli studenti all'interno di spazi scolastici di tipo emergenziale.

Negli Stati Uniti, dove tali soluzioni sono già da alcuni decenni stabilmente in uso come parte integrante del patrimonio edilizio scolastico², sono state sviluppate numerose campagne di monitoraggio delle cosiddette *relocatable classrooms*³ (il termine inglese con cui ci si riferisce alle unità scolastiche prefabbricate) con l'obiettivo di documentarne lo stato di fatto. Nonostante negli USA dal 1998 siano disponibili delle linee guida per la realizzazione e manutenzione di tali interventi⁴, gli esiti delle ricerche hanno permesso di mettere in luce un quadro di numerose criticità, tra cui (Gibson e Eathough, 1968; Michael *et al.*, 1998; Callahan *et al.*, 2000; Katchen *et al.*, 2001; Ander *et al.*, 2003; California Air Resources Board, 2003; Santa Cruz County Grand Jury, 2004; Thomas-rees *et al.*, 2004; Patterson *et al.*, 2009; Raper, 2005; Stephanie D. Thomas-Rees *et al.*, 2009; McMullen e Rouse, 2012; Lucas *et al.*, 2016;):



Fig.23 - Un esempio di *portable classroom* installata presso la Rock Creek Elementary School (Washington County, Oregon, USA) per gestire l'emergenza dovuta al sovraffollamento scolastico (Credits: © Steve Morgan, 2012 da commons.wikimedia.org (Creative Commons Licence))

2. Nel 2005 si stimava che almeno il 33% delle scuole statunitensi (26.700 su 80.910 totali) utilizzasse *portables* come parte integrante delle proprie infrastrutture, e nel 2014 più di 180.000 unità erano in uso presso i distretti scolastici del Nord America (Modular Building Institute, 2014; NCED, 2007).

3. Altri termini diffusi per indicare questo tipo di soluzione sono *portable*, *temporary*, *dismountable* or *mobile buildings/schools/classrooms*.

4. Interagency Working Group on Indoor Air Quality, *Advisory on Relocatable and Renovated Classrooms*.

5. Norme ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers).

- Vetustà e obsolescenza dei manufatti, imputabile al loro utilizzo ben oltre il tempo di vita utile: seppure si tratti di soluzioni di carattere provvisorio, le ricerche hanno dimostrato come spesso i distretti scolastici mantengano stabilmente in uso le unità modulari; tale scelta, in molti casi, deriva dagli elevati costi richiesti dalla dismissione e per ripristinare il sito nelle condizioni originarie;
- Scarse condizioni manutentive e presenza di fenomeni di degrado diffusi, anche a causa di difetti di realizzazione (in particolare nella sigillatura dei giunti) e dell'uso di materiali di scarsa qualità;
- Presenza di rischi ambientali, scarsa qualità dell'aria e forte concentrazione di sostanze inquinanti (VOCs) causata dalla scelta di materiali costruttivi a basso costo ma scarsamente prestanti;
- Costi gestionali elevati, associati alla frequente richiesta di interventi di manutenzione straordinaria e alle spese energetiche elevate.

Sullo stesso filone, nel 2003 due gruppi di ricerca della UCLA School of Public Health di Los Angeles e del Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley, CA, USA) hanno avviato uno studio nazionale sulle condizioni di studio all'interno di aule emergenziali nello Stato della California. Dai dati emersi si è stimato che in media gli spazi sono il 69% più piccoli rispetto ad aule "tradizionali", e in tutti i campioni analizzati si è trovata una concentrazione di VOCs al di sopra dei limiti massimi stabiliti per legge⁵ e superiore rispetto alla media delle altre aule. Le ricadute sulla salute psico-fisica degli studenti sono molteplici, e possono riguardare la comparsa di una sintomatologia, anche cronica, come asma, emicrania, aumento

dell'irritabilità (Hodgson *et al.*, 2001; Shendell, 2003; CARB, 2003, 2005; Apte *et al.*, 2010). Ricerche analoghe sono state condotte in Australia⁶ da un gruppo di ricerca della Deakin University (Melbourne, Victoria, Australia), confermando le scarse prestazioni degli spazi scolastici emergenziali in termini di comfort, di condizioni manutentive e di costi gestionali per le amministrazioni (Luther, 2002; Fuller e Luther, 2003).

Nel corso degli anni, la comunità scientifica si è anche interrogata sugli effetti che la permanenza in una condizione di provvisorietà degli edifici genera sulle capacità di apprendimento. Tra il 2006 e il 2009 in Georgia (USA) sono stati per esempio condotti una serie di studi presso la Kennesaw State University per valutare la variazione delle performance cognitive e comportamentali degli studenti che studiavano in aule realizzate in emergenza. I test hanno rilevato che vi era un aumento dell'irritabilità e della violenza negli studenti che svolgevano le proprie attività all'interno delle *portables*, stabilendo un nesso di relazione tra le scarse condizioni di qualità degli spazi di apprendimento e la risposta comportamentale degli alunni (Cheung Chan, 2006, 2009).

In Italia, seppur non siano disponibili ricerche e/o dati sperimentali sulle prestazioni in uso dei manufatti emergenziali scolastici, le esperienze maturate nell'ambito della gestione post-terremoto – in particolare quella del sisma in Abruzzo del 2009 e del Centro Italia nel 2016 – hanno sollevato un dibattito nella comunità scientifica e nell'opinione pubblica circa l'appropriatezza delle soluzioni containerizzate usate per la predisposizione delle aule scolastiche emergenziali (Moduli ad Uso Scolastico Provvisori, MUSP) (Figg.24,25).

I *feedback* raccolti dall'utenza testimoniano che si tratta di spazi realmente vivibili solo per breve tempo, inadatti per un uso prolungato, a causa delle loro scarse condizioni di comfort spaziale, termo-igrometrico e acustico. A questo proposito, è interessante osservare cosa scrive Manuela Manenti, Responsabile Unico del Procedimento per la realizzazione degli Edifici Scolastici Temporanei (EST), dei Prefabbricati Modulari Scolastici (PMS) e degli edifici pubblici danneggiati dal sisma, nell'ambito della Struttura Tecnica del Commissario Delegato alla ricostruzione in Emilia-Romagna, riferendosi alle strutture scolastiche messe in campo per l'emergenza del post-terremoto nel 2012:

"[...] a proposito dei moduli prefabbricati, è interessante osservare che, nonostante la grande diffusione di ricerche e di applicazioni sperimentali legate alla temporaneità d'uso, molti degli elementi tecnici e funzionali che nell'edilizia tradizionale sono considerati di prassi, sono risultati di difficile o impossibile reperibilità nel caso dei moduli prefabbricati in commercio. Tra gli aspetti che si possono citare vi sono: l'altezza dei vani, in genere non maggiore di 2,7 metri (mentre le scuole e gli spazi di lavoro dovrebbero essere di 3 metri), l'indisponibilità di finestre con ribalta a vasistas (con gli inevitabili rischi dati invece dall'apertura ad anta ad altezza bambino), la non oscurabilità totale delle aperture (necessaria, ad esempio, nelle "zone sonno" dei nidi o delle scuole dell'infanzia), la scarsa arredabilità degli interni (che spesso non consente l'inserimento di mobili tradizionali), la presenza

6. In alcuni Stati dell'Australia l'uso di *portable classrooms* ha fornito una soluzione di rapida implementazione per fronteggiare il problema del sovraffollamento. Ad oggi le unità modulari costituiscono una parte consistente delle infrastrutture scolastiche: si stima che solo nel New South Wales (NSW) il Department for Education and Training possieda un parco di circa 6.000 unità modulari, circa il 12% dell'intero parco scuole nazionale (Slee & Hyde, 2016, 2014).

di porte ad una grande anta unica (anche 120 cm), idonea all'esodo ma di difficile apertura per bambini o disabili, oltre naturalmente all'uso di finiture non certo accattivanti. Alcuni di questi elementi (ad esempio l'altezza interna di 3 metri) è stata inserita dalle imprese come "fuori standard", altri aspetti sono stati invece attenuati solo in fase d'uso dagli operatori della scuola. Un ulteriore aspetto critico è quello della resistenza al fuoco delle strutture [...]. Non riuscendo a reperire componenti pronti in grado di offrire una resistenza al fuoco R60, in via del tutto eccezionale (anche dato il breve tempo di durata previsto per questi edifici) è stata concordata una specifica deroga con la Direzione Regionale dei Vigili del Fuoco, introducendo strutture R30 affiancate però a puntuali ed importanti misure compensative, in grado di assicurare un esodo molto più rapido delle persone. [...] dal punto di vista dell'innovazione tecnica di questi sistemi costruttivi, è da rilevare che molti dei problemi riscontrati sarebbero facilmente superabili in sede di progettazione industriale e che tali modifiche renderebbero certamente più appetibili sul mercato questi moduli, soprattutto trattandosi di caratteristiche di non immediata risoluzione in fase di emergenza" (Manenti e Coccagna, 2014, p. 31).



Fig.24 - Una scuola prefabbricata realizzata a L'Aquila con moduli containerizzati per la gestione del post-sisma del 2009 (Credits: Modulcasaline)

Le parole del RUP per la gestione dell'emergenza scolastica post-sisma in Emilia-Romagna fotografano un'immagine in cui gli strumenti messi in campo sinora rispondono in maniera insoddisfacente all'esigenza di predisposizione di luoghi di apprendimento, che si debbono essere realizzati in emergenza, ma che devono anche essere confrontarsi con le specifiche esigenze delle funzioni pedagogiche.

Il quadro che si prospetta fa emergere la necessità di immaginare schemi e strumenti di risposta diversi, in grado di coniugare le esigenze dell'intervento emergenziale – in primis rapidità, economicità e reversibilità delle opere – con un'adeguata qualità costruttiva e spaziale, nonché con l'imperativo della sostenibilità ambientale. L'innovazione sul tema delle infrastrutture scolastiche emergenziali non è richiamata solo dal quadro della programmazione e normativa nazionale e comunitaria, ma rappresenta anche un mezzo indispensabile ad assicurare il diritto fondamentale, per ogni alunno, di fruire di forme di istruzione adeguate.

2.3. L'educazione scolastica nel diritto internazionale

L'accesso ad adeguate forme di istruzione è uno dei diritti fondamentali dell'uomo. È stato infatti sancito dall'Assemblea Generale delle Nazioni Unite nella **Dichiarazione universale dei diritti umani (1948)**, che all'articolo 26 stabilisce che "ogni individuo ha diritto all'istruzione [...], indirizzata al pieno sviluppo della personalità umana ed al rafforzamento del rispetto dei diritti umani e delle libertà fondamentali" (Dichiarazione Universale Dei Diritti Umani, 1948). L'educazione scolastica rappresenta, nel diritto internazionale, lo strumento prioritario ad assicurare il progresso e lo sviluppo delle nazioni, dal momento che promuove una partecipazione attiva e consapevole alla vita politica e sociale delle comunità. A questo proposito, l'articolo 13 del Patto Internazionale sui diritti economici, sociali e culturali (1966), redatto dal Consiglio economico e sociale delle Nazioni Unite, recita che "l'istruzione deve porre tutti gli individui in grado di partecipare in modo effettivo alla vita di una società libera, deve promuovere la comprensione, la tolleranza e l'amicizia [...]. In questo senso, l'educazione è anche un mezzo attraverso cui combattere le iniquità sociali, favorire l'uguaglianza e le pari opportunità di sviluppo personale e collettivo, e istituire equilibri mondiali basati su democrazia e libertà" (ONU, 1966).

Il principio è stato ripreso nel 1989 anche dalla **Convenzione internazionale sui diritti del fanciullo**, attraverso cui gli stati firmatari si sono impegnati a rendere l'istruzione aperta, accessibile e gratuita per tutti, nonché a promuovere "la regolarità della frequenza scolastica e la diminuzione del tasso di abbandono della scuola" (ONU, 1989, art.28). La Convenzione precisa inoltre le finalità da perseguire attraverso l'educazione scolastica, tra cui lo sviluppo delle capacità e attitudini specifiche dei bambini e degli adolescenti, il rispetto dei diritti e delle libertà fondamentali, la responsabilità civica e per l'ambiente naturale.

Sul piano della programmazione strategica, l'istruzione è stata da sempre posta al centro degli obiettivi internazionali di sviluppo socio-economico, in quanto rappresenta uno strumento vitale per indirizzare il progresso economico delle nazioni sul lungo periodo (Boyi, 2013). Un esempio in questo senso sono i contenuti dell'**Agenda 21**, documento conclusivo della UNESCO World Conference on Environment and Development (Rio Earth Summit, Rio de Janeiro, 1992), che riconosce all'educazione scolastica un ruolo strategico cruciale per garantire la sostenibilità dello sviluppo socio-economico mondiale (UNESCO, 2014).

Nel 2000, la comunità politica internazionale si è nuovamente impegnata a sostenere il diritto all'educazione scolastica nel corso del World Education Forum, attraverso l'adozione del **Dakar Framework for Action** (UNESCO, 2000), un documento di indirizzo di obiettivi mondiali di sostenibilità tra cui si inserisce anche l'accessibilità diffusa ai sistemi per l'apprendimento.

L'anno successivo, per sospingere ulteriormente l'attivazione di misure di sostegno e promozione dell'educazione scolastica, la 56° Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha avviato la UN Literacy Decade 2003-2012, seguita nel 2002 dalla proclamazione della **UN Decade**





of Education for Sustainable Development 2005-2014 (risoluzione 57/254 della 57° Assemblea Generale delle Nazioni Unite); proiettando gli obiettivi al futuro, entrambe le azioni hanno dedicato spazio a favorire una partecipazione diffusa e un coinvolgimento attivo delle nuove generazioni, a cui gli obiettivi sono specificatamente rivolti, nel percorso verso i target di sviluppo sostenibile.

Recentemente, la centralità del ruolo dei sistemi educativi è stata posta al centro della **UNESCO World Conference on Education and Sustainable Development** (*Learning Today for a Sustainable Future Conference*, Nagoya, Giappone, 2014), che ha riconosciuto l'educazione scolastica come uno dei più potenti strumenti a disposizione delle nazioni per raggiungere gli obiettivi di sviluppo sostenibile (UNESCO, 2014).

Le diverse esperienze maturate nel diritto internazionale si sono riversate nei **Sustainable Development Goals (SDGs)**, un quadro sistemico e multi-settoriale di obiettivi mondiali che ruotano attorno alla finalità del progresso sostenibile delle nazioni. I dodici SDGs sono stati individuati nel 2015 dalle Nazioni Unite all'interno dell'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile, e contengono un passaggio fondamentale nel percorso evolutivo verso l'affermazione del diritto all'istruzione. Difatti, il Goal 4: Quality Education per la prima volta lega il diritto all'educazione ad un attributo *qualitativo*; l'obiettivo è non solo quello di garantire l'accesso all'istruzione, ma di promuovere reti e sistemi per un apprendimento inclusivo ed egualitario, soprattutto nei paesi in via di sviluppo, capace di favorire opportunità di crescita per tutte le nazioni. Anche in questo caso, l'educazione è interpretata, in sinergia con gli altri SDGs, quale motore trainante della mobilità socio-economica delle comunità globali, e quale strumento imprescindibile per combattere la povertà e ridurre le iniquità sociali ed economiche (ONU, 2015).

In ambito europeo, il diritto all'educazione scolastica è stato introdotto per la prima volta nel 1952 dal **Protocollo addizionale alla Convenzione europea per la salvaguardia dei diritti dell'uomo e delle libertà fondamentali** (Consiglio d'Europa, 1952), siglato a Parigi dagli Stati membri del Consiglio d'Europa, che riconosce l'universalità del diritto all'istruzione e impegna gli Stati ad adottare misure per assicurarne la compiutezza. Un ulteriore passo dell'impegno europeo nella garanzia del diritto all'educazione scolastica è stato compiuto con la **Carta sociale europea** (Torino, 1996), che stabilisce misure operative per favorire la fruibilità dell'educazione scolastica anche per gli adulti, tra cui l'età minima di accesso al lavoro e il diritto a permessi speciali per seguire percorsi formativi (Consiglio d'Europa, 1996).

Più recentemente, il principio è stato riaffermato dalla Comunità Europea nell'ambito della **Carta Europea dei Diritti Fondamentali (2000)**, stabilendo all'articolo 14 che "ogni individuo ha diritto all'istruzione e all'accesso alla formazione professionale" (Comunità Europea, 2000).

In sintonia con questi obiettivi, negli ultimi anni la Comunità Europea ha costruito strategie condivise focalizzate sui sistemi per l'educazione e l'apprendimento. Tra queste,

nel 2010 è stata avviata la politica di coesione **Europa 2020**, una strategia per una crescita intelligente, sostenibile e inclusiva della comunità degli stati europei. Sostenuta dagli strumenti finanziari del Fondo Sociale Europeo (FSE) e del Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR), l'azione sui sistemi scolastici passava attraverso l'Obiettivo strategico 2 di Europa 2020, che si proponeva di "migliorare la qualità e l'efficacia dell'istruzione e della formazione", ovvero di sviluppare sistemi di istruzione e formazione di elevata qualità, efficaci ed equi, quale strumento essenziale a garantire il successo e la competitività dell'Europa.

A livello nazionale, in Italia il diritto a fruire dell'educazione scolastica è in prima istanza riconosciuto dall'**articolo 34 della Costituzione**, che sancisce l'obbligatorietà e la gratuità dell'istruzione, nonché l'impegno della Repubblica ad abbattere gli ostacoli, anche economici e di mezzi, che limitano o precludono tale diritto. Una peculiarità introdotta dalla Costituzione Italiana riguarda inoltre il principio che l'istruzione, in quanto diritto inalienabile dell'uomo fin dalla nascita, debba ritenersi un servizio essenziale e come tale svincolato dalle leggi del mercato, ovvero da logiche che tendono a marginalizzare i centri minori e/o le fasce economicamente più deboli della società.

In Italia, l'inclusione e il contrasto alla dispersione scolastica, ovvero l'accesso diffuso ed egualitario all'istruzione, rappresentano anche delle priorità politiche; nello specifico, queste sono state individuate dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) nell'**Atto di Indirizzo Politico-istituzionale per l'anno 2020**, che fornisce la base per la definizione degli obiettivi annuali di programmazione e sancisce il ruolo dell'istruzione quale "bene sociale, un investimento per il futuro del Paese e un servizio essenziale, nonché uno strumento di garanzia imprescindibile per il pieno sviluppo della persona umana" (Ministero della Giustizia, 2020).

Sia a livello internazionale che nazionale dunque, l'accesso all'istruzione non soltanto è riconosciuto e tutelato quale diritto fondamentale di tutti gli individui, ma rappresenta anche uno degli strumenti prioritari a supportare lo sviluppo socio-economico delle nazioni. Richiamato da piani e programmi che riguardano gli obiettivi di scolarizzazione globale, il tema del diritto all'istruzione si accompagna ai contenuti della programmazione strategica internazionale, che focalizzano l'attenzione sul tema della *qualità* dell'educazione scolastica, ovvero sulla necessità di promuovere forme di scolarizzazione inclusive, efficaci ed appropriate alle esigenze di sviluppo personale e professionale delle nuove generazioni.

2.4. Il ruolo dell'ambiente scolastico nel processo di apprendimento

In Italia, più della metà dei bambini iscritti alla scuola primaria trascorre, in media, 6 ore ogni giorno all'interno di un'aula scolastica (Commissione Europea, 2020). È il luogo in cui avviene gran parte della crescita e della formazione, carico di valori pedagogici, educativi e simbolici. Uno spazio che il bambino impara a scoprire e conoscere a poco a poco, plasmandolo – più o meno inconsciamente – secondo la propria sensibilità fino a riconoscerne una dimensione domestica, accogliente e rassicurante. L'ambiente di apprendimento è un luogo capace di influenzare la risposta di un alunno nei confronti degli stimoli formativi che gli vengono proposti, determinandone l'efficacia o meno nel percorso di formazione. Tale relazione è dimostrata da numerose ricerche scientifiche, che stabiliscono un nesso diretto tra la qualità di uno spazio scolastico e lo sviluppo psico-pedagogico degli alunni che lo frequentano. I primi riferimenti sul tema si rintracciano alla fine del XVIII secolo in Europa, quando teorie come quella del pedagogista Friedrich Fröbel (1782-1852) prefigurarono la necessità di adattare gli spazi scolastici in funzione delle esigenze educative degli alunni. Tuttavia, fino alla metà del Novecento, l'interazione tra l'apprendimento scolastico e il contesto spaziale costituiva una prerogativa di alcune scuole di metodo, che riflettevano a loro volta il pensiero dei più noti pedagogisti dell'epoca (Mura, 2015). Un esempio tra questi è quello di Maria Montessori (1870-1952), pedagogista nota per l'omonimo metodo educativo; il suo approccio all'insegnamento era tra i primi, in Italia ma anche all'estero, a rinunciare alle tradizionali metodologie di trasmissione delle conoscenze (univocamente dall'insegnante all'alunno) in favore di processi di auto-determinazione promossi dal basso, ovvero dal fanciullo. In questa prospettiva, nel metodo montessoriano lo spazio assumeva – ed assume ancora oggi per le scuole che lo attuano – il fondamentale ruolo di abilitatore dell'autonomia nello sviluppo del bambino, invitandolo all'esplorazione e alla scoperta (Mosa e Tosi, 2016). Tali esperienze rappresentavano però un'eccezionalità rispetto alla maggioranza delle scuole che, dovendo rispondere alla domanda urgente di spazi nel secondo dopoguerra, erano piuttosto improntate a principi di economicità e velocità di realizzazione.

Si dovette attendere la fine degli anni Sessanta in Europa, e gli anni Ottanta in Italia, perché il concetto di mutua interazione tra sviluppo pedagogico e qualità architettonica dello spazio di apprendimento incontrasse la pluralità di tutte le metodologie didattiche (Santoianni, 2017). A partire da questi anni infatti, i nuovi presupposti psico-pedagogici sollevarono un interesse crescente, sia in ambito scientifico che in quello della pratica progettuale, circa le potenzialità educative dello spazio scolastico. Si consolidò la teoria secondo cui le caratteristiche dello spazio architettonico erano direttamente collegate allo sviluppo cognitivo degli alunni; alcuni esperimenti condotti in quegli anni osservarono infatti una perdita di capacità di apprendimento e un aumento dell'aggressività in alunni che erano costretti in ambienti di ridotta dimensione e/o carenti di stimoli. In questo contesto si iniziò quindi a parlare di **“cognizione situata”**, ovvero della necessità di attuare modalità di apprendimento contestualizzate, in spazi specificatamente connotati agli intenti didattici e congeniali agli obiettivi pedagogici specifici per ciascun alunno (Santoianni, 2017).

A partire da questo momento, lo spazio scolastico evolve dunque nella connotazione di un vero e proprio **“ambiente di apprendimento”** (*learning landscape*) (Hertzberger, 2008), ovvero un luogo che ospita processi dal basso, co-organizzati o anche interpretati dagli alunni nelle configurazioni secondo le proprie esigenze, che permettono o viceversa ostacolano comportamenti secondo il concetto di *affordance*⁷. Si tratta di ambienti che rinunciano a rigidi *layout* spaziali e funzionali, ordinati come sequenze di spazi statici e mono-funzionali, in funzione di scenari variabili, flessibili e manipolabili secondo le diverse necessità di uso durante la giornata. Il concetto di flessibilità dei *setting* spaziali assume quindi un valore propedeutico ad assicurare la duttilità dell'ambiente nei confronti di programmi educativi



Fig.25 - *Learning landscape* nel progetto Fuji Kindergarten a Tokyo (Katsuhisa Kida, 2007), uno spazio continuo, programmato dagli alunni in funzione delle loro esigenze (Credits: © Katsuhisa Kida/FOTOTECA da www.tezuka-arch.com)

non più univoci, ma piuttosto costruiti sulla specificità delle istanze contestuali e di quelle psico-pedagogiche dell'alunno (ritmo di vita all'interno della scuola, rapporto con gli insegnanti, relazioni esterne) (Celli *et al.*, 1984). Tali possibilità vengono abilitate dalla scansione dell'organismo edilizio-scolastico secondo tre macro-stratificazioni con grado progressivo di flessibilità e tempo di adattamento, ovvero (1) arredi e allestimenti; (2) materiali e tecnologie, (3) architettura (Mura, 2015).

Tuttavia, queste prime teorie mettono in relazione il comportamento degli studenti con le sole caratteristiche morfologico-spaziali dei luoghi di apprendimento, basandosi sull'osservazione diretta e su valutazioni qualitative del comportamento degli studenti. A partire dai primi anni Novanta del Novecento, in particolare grazie ai contributi delle sperimentazioni statunitensi e inglesi, la ricerca sul tema è progredita parallelamente su due fronti: da un lato, i contenuti della relazione tra spazio e apprendimento hanno cominciato ad essere analizzati quantitativamente con l'esperienza diretta sul campo (Jimenez-Castellanos, 2010); dall'altro, si è verificata l'esistenza di un nesso di causalità anche tra capacità di apprendimento e la qualità ambientale degli spazi scolastici. Le prime ricerche svolte sul tema hanno infatti osservato una variazione delle abilità cognitive direttamente proporzionale ai livelli di illuminazione naturale, isolamento acustico, ventilazione e qualità dell'aria⁸. In Europa, a partire dal 2006 l'International Centre for Indoor Environment and Energy (Technical University of Denmark) ha portato avanti alcuni studi che hanno evidenziato come le condizioni ambientali (complessivamente indicate come Indoor Environmental Quality – IEQ) producano conseguenze dirette sulle performance cognitive degli studenti. Nello specifico, gli studi sono stati effettuati misurando la temperatura e la concentrazione di diossido di carbonio in alcune aule scelte a campione; dai monitoraggi si è arrivati a calcolare un calo di circa il 30% delle performance scolastiche quando tali valori si discostano da quelli previsti dagli standard normativi. Lo studio imputa la diminuzione sia agli effetti diretti sulle capacità di concentrazione degli alunni, che diminuiscono sensibilmente in condizioni di di-

7. Il termine *affordance* ("invito all'uso") è stato coniato nel 1979 dallo psicologo statunitense James Gibson per indicare la capacità da parte di un oggetto fisico, attraverso le proprie qualità e caratteristiche fisico-morfologiche, di suggerire all'utente le azioni appropriate per manipolarlo.

8. Tali ricerche si inseriscono in un campo di sperimentazione sui temi della qualità ambientale degli spazi di lavoro e sull'effetto dei parametri di comfort ambientale *indoor* sul rendimento degli utenti.

scomfort ambientale, sia alle ripercussioni indirette dovute al calo di rendimento degli insegnanti. Gli stessi studi sono arrivati a proiettare le conseguenze di tale fenomeno evidenziandone le ricadute anche in termini di sostenibilità socio-economica, ovvero l'aumento del tasso di malattie per studenti e insegnanti, fenomeni di assenteismo e, sul lungo periodo, riduzione delle capacità di collocamento lavorativo (Wargocki e Wyon, 2006, 2014; Wargocki *et al.*, 2020).

Presso la stessa Università, recentemente è stato concluso un ulteriore studio che ha coinvolto 92 alunni di età compresa tra 10-12 anni; lo scopo è stato quello di misurare quanto la variazione di parametri ambientali indoor producesse effetti sulle capacità di concentrazione e calcolo matematico, ragionamento logico e velocità di elaborazione delle informazioni da parte degli alunni. Variando la combinazione dei parametri ambientali all'interno dell'aula e somministrando contemporaneamente questionari agli alunni, si sono registrati incrementi significativi delle loro capacità cognitive proporzionali all'aumento di parametri quali illuminazione naturale e ventilazione (Hviid *et al.*, 2020).

Analoghe relazioni sono state messe in luce anche dalla ricerca HEAD- Holistic Evidence and Design, condotta nel 2014 presso la University of Salford (Manchester, UK). Si tratta di uno studio prodotto su 153 classi e che ha coinvolto 3766 studenti, attraverso un approccio olistico che ha valutato gli effetti sia della qualità spaziale che di quella ambientale sul rendimento degli studenti. In particolare, la sperimentazione ha previsto la valutazione di tre macro-categorie di performance dello spazio educativo, ovvero: stimolazione (complessità e colore), individualizzazione (*ownership*, flessibilità e connessione) e naturalezza (luce, suoni, qualità dell'aria e contatto con la natura). I risultati dello studio hanno dimostrato un'evidenza scientifica su come tali fattori agiscano sui progressi scolastici degli alunni, stimando un impatto di circa il 16% di riduzione delle performance scolastiche per gli studenti collocati in aule con ridotte qualità spaziali (Barrett, Davies, *et al.*, 2015; Barrett, Zhang, *et al.*, 2015).

In aggiunta, una ricerca condotta in Malesia nel 2012 ha dimostrato come le caratteristiche ambientali degli spazi scolastici producano effetti anche sul comportamento relazionale tra gli alunni. La ricerca ha infatti dimostrato che vi è una correlazione diretta tra un'opportuna illuminazione naturale delle aule e il miglioramento dell'umore da parte degli studenti, con conseguente incremento della qualità del sonno, delle capacità di concentrazione e riduzione dell'aggressività (Mirrahimi *et al.*, 2012).

Infine, alcune recenti ricerche hanno messo in evidenza anche i risvolti socio-economici conseguenti ad una migliore qualità degli spazi di apprendimento. Uno studio del 2013 condotto dal Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley, CA, USA) attraverso il monitoraggio di 162 classi nello Stato della California, ha stimato che il solo aumento del tasso di ventilazione naturale (ovvero di ricambio d'aria) all'interno di un'aula porterebbe a diminuire del 3.4% l'assenteismo degli studenti dovuto alle malattie. Considerando che il sistema di finanziamento degli istituti scolastici privati statunitensi si basa anche sui parametri di frequenza degli alunni, la ricerca è arrivata a valutare che la diminuzione dell'assenteismo porterebbe un incremento annuale di \$33 milioni dei fondi economici diretti alle scuole (Mendell *et al.*, 2013).



Fig.26 - Innovazione nel progetto spaziale degli ambienti di apprendimento. Ørestad College a Copenhagen (3XN, 2007) è una delle "Avanguardie Educative" individuate dall'omonima ricerca di Indire (Credits: © Adam Mørk)

Nel panorama italiano, la centralità dello spazio di apprendimento nel percorso formativo dell'alunno è stata recentemente affermata dalla ricerca Avanguardie Educative, svolta dall'ente di ricerca del Ministero Italiano dell'Istruzione INDIRE (Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa). Si tratta di un progetto di ricerca-azione, finanziato dai Fondi Strutturali Europei nell'ambito del Programma Operativo Nazionale (PON) 2014-2020, che ha avuto l'obiettivo di indagare e individuare un compendio di strategie a supporto dell'innovazione delle infrastrutture educative nazionali. La ricerca ha portato alla stesura del Manifesto Programmatico per l'Innovazione, un documento di sintesi di sette macro-temi che costituiscono gli "orizzonti di riferimento" per la scuola italiana del futuro. Tra questi, il terzo orizzonte riguarda proprio la creazione di spazi di apprendimento innovativi, luoghi di esplorazione attiva che favoriscano "lo star bene a scuola come condizione fondamentale per innalzare le performance degli alunni" (INDIRE, 2014, p. 1).

Il dibattito scientifico converge dunque nell'affermare che la qualità spaziale e ambientale dei luoghi di apprendimento riveste un ruolo determinante nello sviluppo psico-pedagogico degli studenti, contribuendo attivamente al percorso di formazione – didattica e personale – degli alunni. I risultati delle ricerche nazionali e internazionali sviluppate sul tema dimostrano come il progetto architettonico-spaziale degli ambienti di apprendimento debba essere commisurato a requisiti di inclusività, flessibilità, possibilità di adattare e plasmare lo spazio secondo gli innumerevoli scenari di uso ed esigenze di fruizione. Il quadro esigenziale a cui rispondere nel progettare gli spazi per l'educazione deve quindi accogliere e assecondare le istanze di un'utenza che si rivela estremamente sensibile rispetto agli input provenienti dall'ambiente costruito, promuovendo la realizzazione di luoghi di apprendimento capaci di stimolare e supportare opportunamente il percorso di crescita ed educazione degli alunni.

2.5. Il ruolo sociale della scuola nei contesti post-disastro

Il tema della qualità degli spazi scolastici, inteso come uno strumento che abilita il corretto sviluppo nell'apprendimento, assume un ulteriore valore quando è inquadrato in scenari ad elevata marginalità e fragilità territoriale e sociale. Nelle aree rurali dei paesi in via di sviluppo oppure nelle comunità informali, le scuole offrono infatti opportunità per la crescita e l'emancipazione professionale delle nuove generazioni, fornendo agli studenti gli strumenti necessari ad auto-determinarsi e a incrementare le proprie competenze e le capacità occupazionali in futuro. La scuola diventa quindi il luogo in cui si sostengono le azioni di crescita e sviluppo socio-economico, assumendo un ruolo essenziale ad indirizzare il progresso di aree fortemente marginalizzate.

La scuola rappresenta un'istituzione strategica anche nella gestione delle crisi umanitarie legate a eventi naturali catastrofici o conflitti, dalla cui efficacia dipende la capacità di ripresa di intere comunità (Winters, 2007). In questi contesti, la scuola riveste un ruolo duplice, sia come infrastruttura operativa in cui organizzare la gestione delle emergenze, sia come funzione che veicola una sensazione di "normalità" per gli studenti colpiti. Nelle fasi di primo soccorso le scuole vengono infatti di frequente utilizzate per fornire un riparo alla popolazione sfollata, diventando prima riferimento per la gestione dell'emergenza e, successivamente, luogo di aggregazione per l'intera comunità. Per esempio in Italia, dopo il terremoto dell'Isola di Ischia del 2017, i 2600 cittadini sfollati dei Comuni di Casamicciola e Lacco Ameno sono stati ospitati all'interno di due edifici scolastici, rimasti indenni, in attesa dell'allestimento di soluzioni abitative transitorie e/o della riparazione dei danni del sisma. Analogamente, in Australia dopo i terremoti del 2010-2011, le scuole sono state usate come *shelter* temporanei, divenendo poi il fulcro del programma di ripartenza. Gli edifici scolastici sono stati trasformati in *hub* aperti alla comunità colpita per ospitare attività sociali, culturali e sportive, fornendo un aiuto concreto per avviare la ripresa socio-economica della popolazione sfollata; il rapporto con la scuola si è inoltre intensificato, determinando legami stabili che sono proseguiti anche una volta terminata la condizione emergenziale (Mutch, 2015).



Fig.27 - Nel 2018 lo tsunami che ha colpito il villaggio di Sulawesi in Indonesia ha distrutto o gravemente danneggiato oltre 2700 scuole, colpendo circa 180.000 studenti (Credits: © Antonia Roupell/Save the Children)

Nelle fasi di seconda emergenza, per gli studenti il ritorno a scuola assume il significato di ritorno alla quotidianità. Inoltre, attraverso gli insegnanti e il personale, le attività scolastiche assicurano uno strumento di importanza vitale nell'elaborazione del trauma da parte di bambini e adolescenti, che spesso sono costretti ad abbandonare le proprie abitazioni privandosi di legami e relazioni sociali. A questo proposito, è interessante notare come alcuni programmi di supporto psicologico per vittime di catastrofi si basano proprio sull'uso dello spazio scolastico come contesto attivo per ospitare esercizi di elaborazione del trauma, in cui lo studente ritrova un legame con un luogo familiare, ritrovando elementi della normalità venuta a mancare (Le Brocque *et al.*, 2017).

Lo spazio scolastico rappresenta, a tutti gli effetti, il contenitore all'interno del quale prendono avvio di processi di ripresa post-trauma e i percorsi di emancipazione personale e professionale nelle comunità più marginali. Tale ruolo contribuisce a ri-affermare la necessità di pensare ai luoghi per l'educazione come a infrastrutture strategiche, la cui qualità – anche in emergenza – deve essere misurata a obiettivi di appropriatezza, sicurezza, comfort e benessere, riconoscibilità. Fallire nella risposta a queste richieste significa innescare ricadute che, sul lungo periodo, si ripercuotono sullo sviluppo individuale e collettivo (Winters, 2007; Fernandez *et al.*, 2015; Nakanishi e Black, 2016): manifestazione di fenomeni di stress, depressione e ansia negli studenti (cosiddetti disturbi da stress post-traumatico, PTSD), calo del rendimento scolastico, riduzione della frequenza e assenteismo, abbandono precoce del percorso di studi, disoccupazione e povertà.

2.6. La normativa italiana per la progettazione degli edifici scolastici

La consapevolezza circa le capacità educative dello spazio è stata progressivamente assimilata anche nella redazione delle normative e linee guida, nazionali e internazionali, per la progettazione di edifici scolastici, che hanno recepito gli input delle ricerche scientifiche traducendoli in standard e indirizzi metodologici e operativi. A livello internazionale, il quadro normativo appare piuttosto eterogeneo e comprende sia standard prescrittivi e requisiti minimi (spaziali e ambientali), sia linee guida di indirizzo alla progettazione di ambienti di apprendimento (Gallo, 2020). Allo stato attuale, risulta difficile ricostruire un quadro univoco di riferimenti che possa dirsi valido a scala internazionale, dal momento che la legislazione è declinata in ciascun Paese secondo strategie e approcci diversi, variabili anche a seconda delle istanze culturali e scientifiche del contesto. Ciononostante, il comune denominatore delle normative europee si può ritrovare nella crescente attenzione posta ai temi della qualità spaziale e ambientale degli edifici scolastici, che richiama e sostiene gli obiettivi di sostenibilità espressi dalla programmazione internazionale (Cfr. **Pt. I, Cap. 2.3**): supporto della crescita e dello sviluppo degli alunni, qualità dell'istruzione, accessibilità da parte di studenti con bisogni educativi speciali (Special Education Needs, SEN). Gli esempi più virtuosi nel panorama normativo-regolamentare sulla progettazione di spazi scolastici

sono quelli dei paesi del Nord Europa, che per primi hanno integrato una nuova visione degli spazi di crescita nell'ambito della legislazione; tra questi, la Danimarca con il Building Regulation del 2010 e l'Olanda con il Building Decree del 2012 hanno fatto da apri-fila ad un percorso di profondo rinnovamento della progettazione e realizzazione di edifici scolastici, fornendo un modello di riferimento per gran parte delle esperienze successive, tra cui anche quella italiana.

In Italia, attualmente i due principali strumenti di supporto alla progettazione di spazi scolastici sono il **Decreto Ministeriale del 18 dicembre 1975**, *Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica* e le **Linee Guida Ministeriali del 2013**, *Norme tecniche-quadro, contenenti gli indici minimi e massimi di funzionalità urbanistica, edilizia, anche con riferimento alle tecnologie in materia di efficienza e risparmio energetico e produzione da fonti energetiche rinnovabili, e didattica indispensabili a garantire indirizzi progettuali di riferimento adeguati e omogenei sul territorio nazionale*. Nel primo caso, si tratta di un insieme di norme prescrittive che stabiliscono gli standard minimi dimensionali da rispettare nella progettazione di edifici scolastici. Il testo, emanato nel 1975, riflette però ancora un'impostazione rigida degli spazi di apprendimento, gerarchicamente subordinati alla centralità dell'aula. Quest'ultima rappresenta infatti uno spazio deputato all'educazione nel senso più tradizionale del termine, ovvero alla trasmissione di informazioni secondo un percorso unidirezionale, dall'insegnante all'alunno. Le Linee Guida Ministeriali del 2013, in continuità con le esperienze europee e internazionali, offrono invece uno strumento di supporto alla progettazione di spazi scolastici coerente con le rinnovate istanze pedagogico-didattiche. Lo spazio per l'apprendimento è ripensato secondo un modello aperto e dinamico, scandito da sequenze di micro-ambienti dotati di carattere di abitabilità, flessibilità, comfort e benessere, adattabili e riconfigurabili secondo il variare delle esigenze, delle attività svolte e delle necessità peculiari delle utenze che lo utilizzano.

Le linee guida ministeriali si propongono di completare e supportare il quadro normativo preesistente, ormai obsoleto rispetto ai modelli pedagogico-didattici attuali, soprattutto per quanto riguarda la progettazione architettonico-distributiva dello spazio. Gli aspetti inerenti alla qualità ambientale (illuminazione, ventilazione) sono invece disciplinati dalla precitata normativa sui **Criteri Ambientali Minimi**⁹, nello specifico all'art. 2.3.5 – Qualità ambientale interna. La norma affronta il tema della qualità ambientale dell'edilizia scolastica disciplinando l'applicazione di standard minimi prestazionali, validi per tutti gli interventi di nuova edificazione di edifici pubblici, anche richiamando l'applicazione di specifiche norme tecniche dell'Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI).

Mettendo a sistema i riferimenti normativi-regolamentari nazionali per la progettazione degli spazi di apprendimento, si osserva come il tema sia oggi orientato a rinnovati obiettivi e principi di qualità. Diversamente dalla normativa D.M.18/12/1975 – peraltro ancora in vigore – le Linee Guida e il Decreto CAM portano avanti una visione di ambiente di apprendimento innovativa e altamente qualitativa, che non si limita più alla sola verifica di minimi standard di abitabilità, ma si amplia fino a contenere criteri e indirizzi per una progettazione architettonica inclusiva e funzionale ad accogliere i più recenti modelli pedagogici. Recependo e interpretando i risultati delle esperienze nordeuropee, lo spazio scolastico viene interpretato come vero e proprio strumento didattico, mediatore di istanze educative e promotore di una cultura sostenibile per la comunità intera.

9. D.M. 11/10/2017 e ss.mm.ii.

2.7. Emergenza, transitorietà e reversibilità nei modelli di abitare contemporaneo

La pervasività e la portata delle criticità che investono le infrastrutture per l'educazione connotano scenari di intervento emergenziali, ovvero richieste di intervento urgenti, da indirizzare a fronte di risorse limitate. In questa accezione, il tema richiama una corrispondenza con il campo di sperimentazione sulle architetture di emergenza, da cui possibile estrapolare alcuni approcci e metodi di riferimento, da trasferire alla realizzazione degli interventi di edilizia scolastica nei contesti che si sono individuati. L'abitare contemporaneo risulta ormai intrinsecamente connotato da stati emergenziali, e anche l'intervento in condizioni "ordinarie" può trovare nelle architetture per l'emergenza interessanti spunti di riflessione e corrispondenze rispondere con efficacia alle esigenze della società attuale.

Emergenziale, temporaneo, effimero, sono termini che, seppur abbiano significati diversi, da sempre sono stati usati in architettura come sinonimi per esprimere una condizione di provvisorietà. Seguendo l'interpretazione semantica della parola "emergenza", si è portati a considerarla come una condizione di eccezionalità, contingentata in periodi di breve durata ed opposta rispetto ad uno stato *normale, di quiete*. In architettura, ciò che è costruito per e nell'emergenza ha intrinseco in sé il destino di essere decostruito, di scomparire e non di restare, e implicitamente non gli si richiede una qualità superiore a quella essenziale alla sua funzione transitoria. L'architettura emergenziale è quella dei manufatti effimeri, opposta a quella – più propriamente detta – permanente, duratura. L'esercizio non è meramente interpretativo: le parole, in questo caso, veicolano l'attribuzione di precisi valori agli edifici – qualità tecnica, costruttiva, spaziale – sulla base del loro *ciclo di vita utile*. Il tempo di uso previsto condensa l'unico parametro sulla base del quale si legittima un investimento, sia esso sforzo creativo o risorsa materiale, per elevare la qualità di un'architettura. Se gli edifici "*permanenti*" necessitano di criteri progettuali adeguati a veicolare il messaggio di stabilità (addirittura eternità) – ereditando un pensiero proprio della monumentalità classica – al contrario quelli per l'emergenza sono associati a paradigmi di abitabilità provvisoria e standard qualitativi minimi, se non sotto-dimensio-



Fig.28 - La *jurta* è un archetipo di architettura nomade improntata a principi di trasportabilità, assemblabilità e dismessibilità ciclica, ancora in uso presso le comunità mongole e kirgise (Credits: © Stefano Tronci/Shutterstock.com)

nati. A questo proposito, è interessante per esempio notare come la Direttiva 2010/31/EU, che stabilisce i requisiti di efficienza energetica per gli edifici pubblici, esonera gli Stati membri dal fissare dei livelli minimi per “tutti gli edifici temporanei con un tempo di utilizzo non superiore a due anni” (art.4, comma 2, lettera c), veicolando implicitamente una netta demarcazione, in termini di qualità prestazionale, tra l’architettura considerata effimera e ciò che invece è “costruito per restare”.

Oggi, una visione di questo tipo non può che apparire anacronistica. Negli ultimi decenni, profondi cambiamenti ambientali, culturali ed economici hanno investito, sconvolgendoli, gli assetti territoriali e sociali tradizionali. La staticità che, per secoli, ha contraddistinto i fenomeni antropologici ha ceduto il passo ad una dinamicità finora inedita, che genera uno stato di costante instabilità all’interno dei tessuti urbani e relazionali. Il primo cambiamento riguarda l’inversione del rapporto proporzionale tra stati *emergenziali* e *ordinari*. Gli sconvolgimenti ambientali degli ultimi anni hanno incrementato la frequenza e l’intensità con cui si manifestano fenomeni naturali disastrosi (Coronese *et al.*, 2019), al punto da connaturare il tema stesso dell’abitare contemporaneo ad uno stato di *persistente emergenza* (Bologna e Terpolilli, 2005; Antonini *et al.*, 2020). Allo stesso tempo, nuovi stili di vita, basati sulla velocità, sulla mobilità e connettività globale (il cosiddetto dinamismo sociale prefigurato da Bauman, 2002) hanno generato “una diffusione della cultura dell’abitabilità transitoria” (Bologna e Terpolilli, 2005, p. 14). Urbanesimo, gentrificazione, immigrazione, sfollamento, funzioni stagionali legate all’abitare (lavoratori, studenti) definiscono oggi nuove condizioni di “permanente mobilità” (Bologna e Terpolilli, 2005, p. 12) che di fatto esauriscono il concetto di permanenza in architettura. Al contrario, i caratteri di temporaneità diventano oggi il “riferimento paradigmatico nello scenario dell’abitare contemporaneo” (Bertoldini *et al.*, 2009, p. 2), richiedendo all’intero ambito progettuale-architettonico di subordinare lo spazio costruito ad imperativi di adattabilità, flessibilità spaziale e temporale (Marrone *et al.*, 2020).

In questo scenario si manifestano due sostanziali ripensamenti. Il primo: il progetto emergenziale, storicamente circoscritto a scenari ad elevata transitorietà, viene ricompreso nel “fare architettura” in virtù di nuovi scenari



Fig.29 - Aggregato di *mobile homes* negli Stati Uniti; nel paese tale soluzione è ampiamente utilizzata come mezzo per assecondare le esigenze di un "nuovo nomadismo" (Credits: © Mark Smith da www.geograph.org.uk (Creative Commons Licence))

È infine possibile pensare ad un manufatto architettonico temporaneo che sia portatile, [...] capace di non lasciare traccia di sé dopo l'uso, e che al tempo stesso sia anche adattabile, ossia versatile, modificabile e riconfigurabile?

Zanelli, 2006

applicativi, che ne richiamano la riflessione sugli aspetti tipologico-spaziali e tecnologico-costruttivi. Anche agli edifici temporanei è quindi richiesto di esprimere una impeccabile esecuzione, ottimi materiali, e tendere verso gli obiettivi di sostenibilità ambientale e socio-economica oramai richiesti a tutte le nuove costruzioni (D'Auria, 2014). Il secondo: nella prospettiva del progetto contemporaneo trovano sempre maggiore appropriatezza gli attributi propri dell'architettura emergenziale, e in particolare la transitorietà e la reversibilità degli interventi. Nella prospettiva di rispondere agli imperativi di sostenibilità ambientale, circolarità delle risorse, riduzione dell'impatto, risultano di interesse quei modelli costruttivi, trasferiti dal campo dei manufatti per l'emergenza, improntati alla temporaneità come una durata commisurata all'utilità degli edifici. Si tratta di approntare progetti commisurati a valori di utilità, funzionalità, obsolescenza programmata (Bologna e Terpolilli, 2005) considerando gli edifici alla stregua di "beni di consumo" funzionali al soddisfacimento delle esigenze della comunità, in grado di materializzarsi e decostruirsi in precisi istanti voluti. In questa prospettiva, la misura del tempo non è più una condizione inesauribile di permanenza, piuttosto un "orizzonte di riferimento" rispetto a cui prevedere le opzioni di integrazione, smontaggio e re-immissione dell'edificio (o delle sue parti) nel flusso di materiali e di energia (Zanelli *et al.*, 2010). Nel contesto culturale, scientifico e normativo attuale, la misura del costruire risulta dunque intrinsecamente temporanea, richiedendo fin dalla concezione dell'edificio di prevedere e anticipare le modalità di gestione delle risorse al termine dell'uso/vita dei manufatti; in questo senso, la tradizionale dicotomia temporaneo-permanente sfuma verso l'attribuzione di più appropriati livelli di durabilità secondo una *temporaneità di breve, medio o lungo termine*.

Le medesime considerazioni possono essere trasferite anche al tema dell'edilizia scolastica. Si è visto infatti come l'apprendimento scolastico sia oggetto di condizioni di emergenza generate dall'instabilità socio-demografica e/o dagli effetti degli sconvolgimenti ambientali (Vincent-Lancrin, 2008). Tali contingenze richiedono alle infrastrutture scolastiche una continua capacità di contrazione, dilatazione e spostamento dell'offerta formativa, ovvero una capacità di mutamento che risulta oramai incompatibile con l'ideale di staticità e immutabilità degli edifici. Un interessante spunto di riflessione a questo proposito viene dal modello organizzativo adottato negli Stati Uniti e in Australia per la gestione delle emergenze legate all'aumento demografico e sovraffollamento delle aule. Per far fronte alla variabilità annuale delle iscrizioni nelle scuole pubbliche, alcuni distretti hanno deciso di svincolare una parte del proprio parco scuole da una precisa collocazione in un sito, rendendo intenzionalmente "impermanente" una parte delle infrastrut-

ture. Si è perciò stabilito che la dotazione di aule dei distretti scolastici dovesse essere costituita per almeno un terzo di unità scolastiche ricollocabili, che potessero essere annualmente smontate e ricollocate in diversi siti secondo le esigenze degli istituti (McMullen e Rouse, 2012; Goetz, 2014). Una logica funzionale ed efficace ad assecondare i requisiti di flessibilità e adattabilità delle infrastrutture pur garantendo la reversibilità, sostenibilità ambientale ed economica degli interventi.

Nel contesto italiano, le modalità con cui si sono affrontate le contingenze scolastiche emergenziali si sono rivelate inefficaci a gestire la transitorietà e reversibilità degli interventi. Analizzando per esempio le esperienze maturate nel post-terremoto, è possibile osservare come la dichiarata provvisorietà delle soluzioni scolastiche emergenziali sia sfumata fino a diventare una condizione di normalità, esaurendo di fatto l'attribuzione di (impropri) caratteri di eccezionalità e transitorietà (Bologna e Terpolilli, 2005; D'Auria, 2014). La complessità dei fattori contestuali, di natura ambientale, politico-economica e sociale, uniti ad una generalizzata lentezza delle fasi di ricostruzione post-catastrofe, ha infatti determinato il prolungamento dell'uso delle soluzioni emergenziali ben oltre il tempo di vita utile dei manufatti stessi. Basti pensare che ancora oggi, a 12 anni dal terremoto che colpì L'Aquila nel 2009, 3600 studenti (il 60% del totale su tutto il territorio comunale), svolgono ancora le attività didattiche in strutture emergenziali (Fonzi, 2019), di cui in origine era previsto un periodo di uso di circa 6 mesi, funzionale alla ricostruzione. Soluzioni inizialmente provvisorie, realizzate in deroga ai minimi standard normativi edilizi (altezza delle aule, illuminazione e ventilazione naturale) in virtù dell'urgenza di intervento, ma che nel lungo periodo si rivelano inappropriate ad accogliere le funzioni legate all'apprendimento.

Alla luce di questo quadro, appare chiaro come affrontare il tema della progettazione per l'emergenza significhi oggi arricchire il quadro esigenziale di una complessità che non può più essere gestita nel binomio "temporaneo-permanente", estrapolando a priori livelli di qualità predeterminati. Occorre piuttosto individuare, anche alla luce delle nuove tecnologie e potenzialità della produzione edilizia, opportune modalità tecnico-operative che assecondino l'indeterminatezza delle condizioni di intervento, interpretando l'adattabilità quale chiave di lettura per il ripensamento dei paradigmi storici del progetto emergenziale.

2.8. Riletture del quadro esigenziale per l'architettura scolastica di emergenza

Il tema dell'architettura scolastica emergenziale si inserisce in un *background* culturale e scientifico profondamente modificato rispetto al passato, plasmato dalle nuove esigenze della società contemporanea, dagli input della programmazione e normativa di settore e dagli approcci suggeriti dalle ricerche sul tema della qualità dello spazio educativo. Affrontare il tema presuppone inoltre di attribuire all'attributo emergenziale un significato più ampio, che comprende molteplici scenari di intervento ed esigenze da soddisfare: non solo contingenze post-catastrofe, ma anche contesti ad elevata vulnerabilità territoriale, economica e sociale, aree di rapida espansione ed instabilità socio-demografica.

I principali cambiamenti metodologici e di approccio che hanno investito il tema possono essere sintetizzati in tre direzioni di innovazione/evoluzione, ovvero:

- **La rinnovata attenzione ai temi della sostenibilità** ambientale, economica e sociale dell'edilizia pubblica e del settore AEC in generale, richiamati dagli obiettivi internazionali di neutralità climatica, rende cogente la riduzione dell'impatto economico-ambientale del ciclo di vita dei nuovi edifici, tra cui quelli emergenziali, e favoriscono l'incremento della loro incisività sul tessuto socio-culturale locale;
- **Il nesso di relazione che esiste tra la qualità dello spazio scolastico e lo sviluppo psico-pedagogico degli alunni**, uniti agli indirizzi per la progettazione di ambienti di apprendimento innovativi e stimolanti, richiama esigenze di qualità ambientale, inclusività, adattabilità dello spazio, configurabilità e riconoscibilità degli interventi.
- **La rilettura dell'attributo temporaneo**, necessaria in virtù della pervasività dei fenomeni emergenziali e dell'imminente transizione ecologica del settore AEC, presuppone di abbandonare logiche di precarietà dei manufatti in funzione di più appropriati principi di flessibilità spaziale, adattabilità nel tempo, reversibilità e reintegrabilità nel flusso di materia.

Marcare i limiti di queste reinterpretazioni, delineandone le ricadute per la progettazione delle nuove infrastrutture scolastiche di emergenza, rappresenta una premessa essenziale ad attivare una risposta idonea alle urgenze in atto, ovvero a mettere a fuoco il quadro esigenziale aggiornato a cui rispondere attraverso le future azioni di ricerca.

Rispetto al quadro di riferimento normativo, culturale e tecnologico che si è delineato, un approccio di ricerca coerente e aggiornato è quello che adotta la sostenibilità come *fil rouge* per guidare il progetto e realizzazione dei manufatti scolastici emergenziali, un attributo che si declina nei suoi diversi contenuti:

- Ambientali, ovvero che mira alla riduzione dell'impatto del ciclo di vita dei nuovi edifici, attraverso l'efficienza energetica, l'uso di materiali locali, naturali e circolari;
- Economici, cioè il miglioramento dell'efficacia dei processi edilizi, l'incremento della qualità e la riduzione degli errori nelle fasi di esecuzione, oltre che l'ottimizzazione delle risorse materiali, dei tempi e dei costi di intervento;
- Sociali, ovvero la ricerca di una qualità spaziale e ambientale appropriata alle nuove istanze pedagogiche e didattiche, oltre che di trasformare le condizioni emergenziali in occasioni di sviluppo e crescita personale per gli studenti.

Il quadro esigenziale che deriva dalla ricognizione del quadro di riferimento mette dunque a sistema (1) le istanze di sostenibilità rivolte al settore AEC, (2) quelle normative e di indirizzo per la progettazione degli interventi di edilizia scolastica innovative e (3) quelle peculiari richieste dall'intervento in emergenza. Da questi tre macro-temi discendono nuovi presupposti per la realizzazione di manufatti scolastici emergenziali, che il processo edilizio è chiamato ad integrare nelle diverse fasi di progetto, fabbricazione, uso e gestione degli edifici. I requisiti di riferimento che emergono

possono essere sintetizzati come (Bologna e Terpolilli, 2005; Bologna, 2008; Giglio, 2018):

- **Flessibilità e adattabilità:** intesa sia alla scala di edificio che di insediamento, presuppone di selezionare soluzioni progettuali e tecnico-realizzative che favoriscono l'incrementabilità e/o decostruibilità degli edifici, l'integrabilità e addizione/sottrazione di spazi, con l'obiettivo di favorire le capacità di adeguamento della scuola in funzione del cambiamento delle esigenze nel tempo e nello spazio;
- **Reversibilità,** ovvero la capacità dei manufatti di essere riassorbiti dal contesto territoriale e produttivo in cui si inseriscono, di essere reimmessi all'interno delle catene di valore delle risorse secondo i concetti propri dell'economia circolare (riciclo/riuso dei componenti e dei materiali), di ripristinare il sito di intervento nelle condizioni originarie, in modo che possa essere restituito alla comunità per gli usi originari;
- **Elevata qualità costruttiva,** da interpretare come valore architettonico e opportuni livelli di configurabilità spaziale, comfort ambientale e qualità dei materiali, fattori propedeutici a supportare gli obiettivi educativi e pedagogici;
- **Qualità di processo,** che si declina non solo negli obiettivi di prevedibilità, rapidità ed economicità di realizzazione dei manufatti, ma anche nella riduzione degli impatti economico-sociali degli interventi. Si tratta cioè di razionalizzare le risorse materiali e immateriali coinvolte, integrare e coordinare la molteplicità di fasi, attori e competenze coinvolte per rendere agili gli scambi di informazioni – anche grazie all'uso di strumenti digitalizzati –, favorire il controllo delle performance, dei tempi e dei costi del processo edilizio;
- **Riduzione dell'impatto ambientale,** ovvero la riduzione delle emissioni durante l'intero ciclo di vita dei manufatti, attraverso il controllo della qualità costruttiva una gestione sostenibile delle filiere di approvvigionamento dei materiali; assumono importanza in questa prospettiva le strategie di utilizzo di materiali altamente prestazionali e a ridotto carico ambientale, provenienti da fonti di approvvigionamento locali e con elevato potere di circolarità.

La risposta alle esigenze che si sono delineate consente di immaginare una risposta opportuna, innovativa, efficiente e scalabile alla problematica infrastrutturale dei sistemi per l'educazione, permettendo contemporaneamente di adempiere alle richieste di qualità dei nuovi edifici scolastici per contribuire alle strategie di resilienza dell'intero sistema costruito nei confronti delle future crisi ambientali e sociali.



THE FAILURE OF DOMESTICATION - ALMOST HALF OF THE SCHOOLS ARE AT RISK

I.3 Lo stato dell'arte sulle infrastrutture educative di emergenza

3.1. Piani e programmi per l'infrastrutturazione scolastica

Già dalla seconda metà del Novecento, l'edilizia scolastica è stata oggetto di una serie di piani e programmi che miravano a promuovere azioni sistematiche per l'infrastrutturazione scolastica, in modo particolare indirizzate a rispondere alle crisi provocate dall'aumento demografico negli anni del boom economico. Soprattutto nei paesi occidentali, la portata dei cambiamenti socio-economici dell'epoca è stata tale da generare uno stato emergenziale nella ricerca di spazi per l'educazione, richiedendo – analogamente a quanto accaduto per l'edilizia residenziale – l'urgente realizzazione di un quantitativo consistente di nuovi edifici scolastici. Le tecniche costruttive tradizionali, visti i limiti di tempo e di risorse economiche a disposizione, non avrebbero potuto essere verosimilmente sfruttate per soddisfare il fabbisogno di edifici. Per questo motivo, già alla metà del secolo scorso si faceva affidamento sull'utilizzo di tecnologie costruttive basate sulla fabbricazione fuori opera di componenti edilizi, prodotti secondo tecniche di industrializzazione pesante. La prima esperienza in questa direzione è quella sviluppata dall'azienda tedesca **Christoph & Unmack**; inizialmente concentrata sulla produzione di unità residenziali a catalogo, nel 1880 introdusse per la prima volta in Europa un sistema tecnologico basato su pannelli prodotti industrialmente, che potevano essere assemblati per costruire, velocemente e a basso costo, edifici scolastici nelle aree di nuova urbanizzazione. La proposta dimostrò l'efficacia della produzione *off-site* nel rispondere alle richieste delle amministrazioni pubbliche e dei tecnici rispetto per la realizzazione dei nuovi edifici scolastici, per i quali si ricercavano soluzioni economiche e di rapida implementazione. Il successo delle realizzazioni tedesche fu tale da essere esportate, in pochi anni, in tutta Europa e nel resto del mondo, e in particolare in tutti quei paesi occidentali che si stavano ugualmente confrontando con gli effetti dell'aumento demografico e con le problematiche legate alla ricostruzione post-bellica (Staib *et al.*, 2007).

Negli stessi anni, il tema dell'infrastrutturazione scolastica fu dibattuto anche dalla comunità scientifica livello internazionale, vista la crescita esponenziale di costruzioni per edilizia scolastica. Nel 1957 il problema fu portato all'attenzione pubblica in occasione della **XX Conferenza Internazionale dell'Educazione di Ginevra**, che raccomandò la creazione, insieme all'Unesco, di un centro internazionale per l'edilizia scolastica. La proposta fu accolta con la fondazione del Centro Internazionale per le Costruzioni Scolastiche (CICS) a Losanna, a cui furono demandate funzioni di coordinamento delle ricerche internazionali nel campo delle infrastrutture educative, nonché di diffusione degli esiti delle ricerche nei paesi in via di sviluppo come modelli da replicare. In questi anni, le proposte avanzate dagli organismi di programmazione per far fronte alle emergenze del settore scolastico si allinearono sul ricorso all'industrializzazione della produzione edilizia come una strategia imprescindibile per assolvere "all'urgenza e alla vastità del fabbisogno" (Morabito e Palumbo, 1966, p. 290). Tale indirizzo si accostava comunque ad una riflessione critica sulle modalità

Fig.30 - Installazione nel Padiglione del Perù *Our Amazon Frontline* alla Biennale di Venezia 2016 *Reporting From the Front*, incentrato sulla condizione di profonda fragilità dei sistemi educativi nelle comunità rurali dell'Amazzonia peruviana (Credits: © Andrea Avezù, 2018)

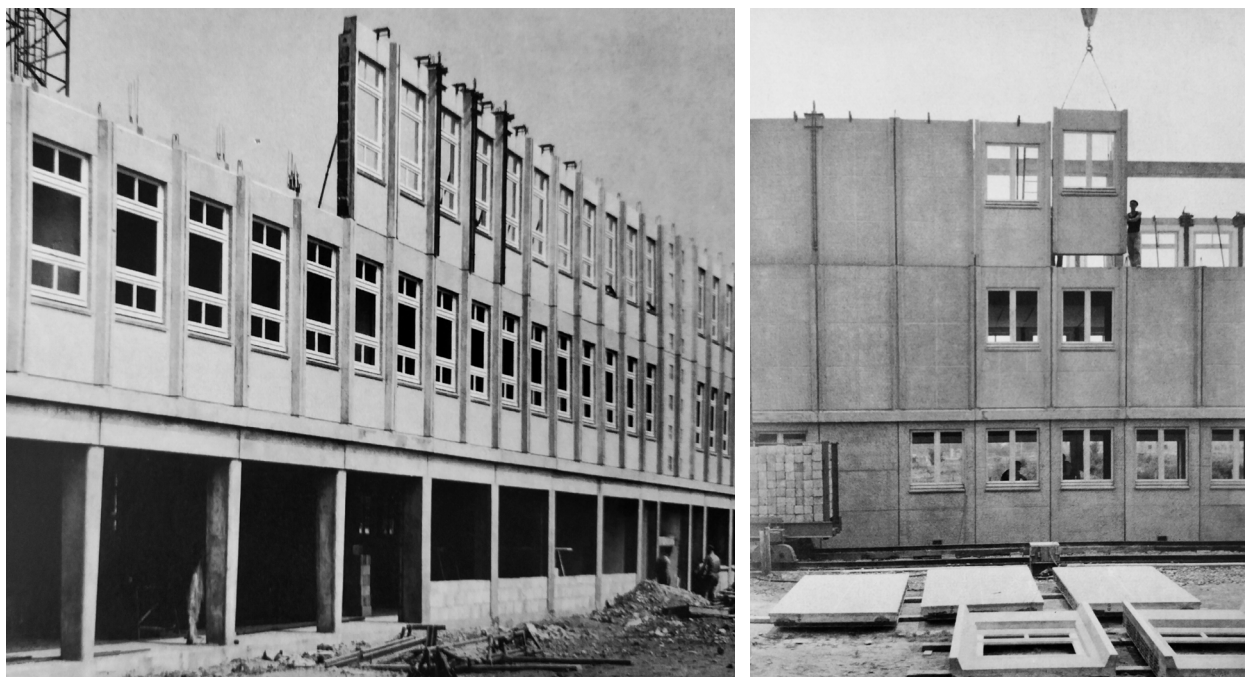


Fig.31 - Nella seconda metà del Novecento, la prefabbricazione ha rappresentato la strategia essenziale a rispondere alla vastità e all'urgenza di realizzazione di nuove scuole. Nell'immagine, la costruzione di una scuola primaria a Carcassone (Francia) con il sistema prefabbricato Fiorio (Credits: © H. Baranger)

tecnico-operative con cui era necessario affrontare la progettazione e la realizzazione delle nuove scuole, denunciando l'inapplicabilità dei principi dell'industrializzazione pesante – standardizzazione e produzione in serie – e auspicando un approccio alla prefabbricazione che fosse in grado di assecondare proposte progettuali variabili e diversificate.

Il ruolo della prefabbricazione edilizia nei programmi di infrastrutturazione scolastica della seconda metà del Novecento è ribadito dal saggio *Industrializzazione e prefabbricazione nella edilizia scolastica all'estero: aspetti ed esperienze* (Morabito e Palumbo, 1966), che raccoglie un'esaustiva ed interessante indagine sulle esperienze di uso di tecniche di produzione industrializzata per l'edilizia scolastica nella seconda metà del Novecento in Europa. Il testo esamina infatti un ampio repertorio di esperienze sviluppate in Francia (Fig.31), Belgio, Olanda, Danimarca, Inghilterra, Germania, Svizzera, Polonia, per implementare l'allora insufficiente patrimonio infrastrutturale scolastico, secondo un approccio operativo basato sull'uso di tecniche di prefabbricazione pesante. Il testo dimostra come, già dalla metà dello scorso secolo, l'industrializzazione edilizia rappresentasse una metodologia di intervento essenziale a sostenere l'urgente questione dell'infrastrutturazione scolastica, configurandosi come l'unica tecnica in grado di mediare le istanze funzionali con i vincoli temporali ed economici.

Anche in tempi più recenti, molti paesi hanno destinato risorse all'implementazione di vasti programmi nazionali per l'infrastrutturazione scolastica che, affiancati ad azioni di supporto socio-economico¹ (abolizione del lavoro minorile, diminuzione dei costi di accesso all'istruzione, programmi di impiego per le madri, miglioramento delle condizioni lavorative degli insegnanti), hanno avuto l'obiettivo di contrastare le cause di marginalità ed

1. Tra le linee di supporto recentemente attivate in questa direzione, troviamo anche il programma dell'Unione Europea Next Generation EU, il fondo da 750 miliardi di euro che ha l'obiettivo di fornire agli Stati membri uno strumento di riparazione dei danni socio-economici provocati dalla crisi pandemica del Covid-19 e affrontare le imminenti sfide ambientali, tecnologiche e sociali. A fronte di tale pacchetto di investimenti, l'Italia tramite il Ministero dell'Economia e delle Finanze ha presentato il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), un programma di mobilitazione dei fondi provenienti dall'EU suddiviso in sei missioni, che raggruppano a loro volta 16 componenti strategiche e 48 linee di investimento. Tra queste, la prima componente della missione "Istruzione e Ricerca" è dedicata proprio al diritto allo studio e al potenziamento delle competenze, impegnando 16.7 miliardi di risorse economiche in azioni di promozione dell'educazione scolastica contro "la povertà educativa e i divari territoriali nella quantità e qualità dell'istruzione" (Ministero delle Economie e delle Finanze, 2021).

esclusione dai percorsi di formazione didattica.

Un esempio è quello inglese, e nello specifico l'esperienza maturata nel fronteggiare la crisi dovuta all'aumento demografico e alla scarsità di infrastrutture scolastiche. A partire dal 2005, un primo tentativo di indirizzare tale problematica si è avuto con **Building Schools for the Future (BSF)**, un piano statale di investimento da 55 milioni di sterline (circa 65 milioni di euro) che si proponeva di iniziare una fase di radicale cambiamento per l'edilizia scolastica; l'intento operativo, dichiarato dall'allora Primo Ministro Tony Blair, era addirittura quello di riqualificare e/o sostituire l'intero *stock* di edilizia scolastica secondaria del paese in quindici anni (National Audit Office, 2009). Accanto agli interventi di riqualificazione, erano infatti previsti progetti di realizzazione di nuove infrastrutture scolastiche in tutto il Paese, che avrebbero dovuto integrare quelle preesistenti e alleviare la pressione dovuta al crescente sovraffollamento (Fig.32). Nel 2006, il BSF è stato integrato dalla previsione di intervento su ulteriori 700 scuole primarie, supportato da un fondo triennale da un miliardo di sterline attivato nell'ambito del complementare Primary Capital Programme (PCP). Dal punto di vista gestionale dei fondi, il programma era supervisionato da Partnership for Schools (Pfs), un ente non-governativo formato dalla *joint venture* di enti privati con il Department for Children, Schools and Families e Partnership UK e con il coinvolgimento di 96 autorità locali. Considerato il programma più ambizioso mai avviato nel Paese, il BSF è stato però fin dall'inizio oggetto di critiche e preoccupazioni circa la sua reale fattibilità, e in particolare sulla insostenibilità dei tempi e dei costi necessari alla sua attuazione. A posteriori, si è infatti visto come il programma fosse stato inizialmente sotto-stimato nella sua portata, con le problematiche maggiori riscontrate nella progressiva dilatazione dei tempi e costi degli interventi e nel coordinamento dei fondi da destinare alle autorità locali. Le criticità riscontrate, unite all'insediamento dell'*austerità* e ad un clima di critica crescente rispetto alla sostenibilità economico-sociale del BSF, hanno portato all'abbandono del programma nel 2010. A sei anni dal suo inizio, solo un quinto degli interventi previsti è stato portato a termine, lasciando 231 scuole in costruzione e circa 1000 da realizzare. Nell'ambito del BSF, il tema della qualità delle infrastrutture è stato intercettato da un periodo di revisione degli standard qualitativi degli edifici pubblici, diretti verso il miglioramento dell'efficienza energetica e l'adozione di un approccio *green* alle costruzioni. Secondo queste indicazioni, ai nuovi edifici pubblici era richiesto di produrre performance allineate agli standard del Building Research Establishment Environmental Assessment (BREAM), un protocollo di certificazione



Fig.32 - Yardles School a Birmingham, realizzata nell'ambito del programma BSF (Credits: Foto Aedas AHR © Crown copyright 2003/DFES/0134/2003)

ambientale che promuove la riduzione dell'impatto del ciclo di vita degli edifici. Ciononostante, l'indeterminatezza del primo periodo di avvio delle nuove disposizioni ha fornito il pretesto per delegittimare l'adozione degli standard BRE-EAM in favore di tecnologie e materiali tradizionali, a basso costo e meno performanti (National Audit Office, 2009). A questo proposito, uno studio condotto da alcuni ricercatori inglesi ha monitorato, tra il 2007 e il 2010, le performance ambientali ed energetiche di un campione di cinque scuole realizzate nell'ambito del BSF, scoprendo che i consumi elettrici negli edifici erano tra il 37 e il 191% maggiori rispetto alla media delle scuole nel Paese, e comunque significativamente distanti da quelli attesi in fase di progetto. Inoltre, lo studio ha rivelato che le emissioni di CO₂ associate ai consumi energetici dei nuovi edifici erano, in tutti e cinque i casi analizzati, superiori rispetto alla media delle scuole preesistenti (Burman *et al.*, 2018). Al BSF è subentrato, dal 2014, il **Priority School Building Programme (PSBP)**, con un target di intervento di 261 scuole da riqualificare e/o ricostruire in tre anni. Analogamente al programma precedente, anche quest'ultimo si è posto come obiettivo l'implementazione di un nuovo tessuto infrastrutturale scolastico complementare all'esistente, funzionale a migliorare la qualità dell'apprendimento e le condizioni di fruizione delle scuole (Fig.33). Attualmente, gli indirizzi del PSBP sono stati parzialmente vanificati dalle ridotte risorse economiche destinate all'attuazione del programma, dal momento che il quinquennio di programmazione finanziaria 2015-2020 ha visto una riduzione del 4.6% del budget a disposizione per l'intero comparto dell'edilizia scolastica. Se relazionata con il numero di interventi richiesti, la dotazione stimata per ciascuna scuola è di circa 1100£/m² (1300 €/m²), una cifra estremamente sottostimata rispetto ai costi unitari di mercato per le opere pubbliche (The Scape Group, 2019). La riduzione del budget a disposizione si è riversata in molti casi in una diminuzione dei livelli di qualità delle nuove infrastrutture tra cui, la riduzione della dotazione spaziale; un'inchiesta condotta dal Royal Institute of British Architects (RIBA) ha infatti stimato che le scuole realizzate nell'ambito del PSBP hanno spazi ridotti del 15% rispetto alla media, e risultano spesso prive di atri, biblioteche e spazi collettivi, con il rischio di innescare fenomeni come scarsa socializzazione e bullismo. In alcuni casi inoltre, l'esiguità delle risorse economiche ha legittimato il ricorso a soluzioni tecno-



Fig.33 - La Yorkon Pyrford Primary School è una delle scuole realizzate nell'ambito del PSBP (2015) (Credits: © Mott MacDonald)

logiche scarsamente prestanti e a basso costo; similmente a quanto accaduto con BSF, gli effetti di tali scelte si sono riversati in una diminuzione dell'efficienza delle nuove infrastrutture, aumento dei consumi, dei costi di esercizio e manutenzione a carico delle scuole. Inoltre, nei primi anni di attuazione del programma, un'altra delle criticità rilevate ha riguardato il prolungamento dei tempi di realizzazione degli interventi; difatti, i progressi attuali risultano significativamente rallentati rispetto alle stime iniziali, e nei primi 3 anni sono state realizzate soltanto 30 delle scuole previste (RIBA, 2014). La necessità quindi di ottimizzare i tempi e i costi degli interventi, senza però compromettere la qualità dei nuovi edifici, è stata indirizzata incoraggiando l'uso di soluzioni standardizzate e di tecnologie di prefabbricazione edilizia, basate sull'assemblaggio *off-site* dei componenti. Alcuni esempi di interventi realizzati con tale approccio sono quelli implementati da Portakabin, una delle più grandi aziende di prefabbricazione del Paese, nell'ambito di un affidamento per la realizzazione di strutture modulari prefabbricate in prossimità di alcune scuole in Inghilterra che, gravate da fenomeni di affollamento e carenza di spazio, necessitavano in breve tempo di disporre di locali aggiuntivi. L'impiego di tecnologie di prefabbricazione ha garantito la contrazione fino al 40% dei tempi di realizzazione rispetto a sistemi tradizionali di costruzione (da 14 a 6 settimane) e, nel caso di ampliamenti, tale strategia ha permesso di ridurre l'interferenza del cantiere sulle attività scolastiche limitrofe, che hanno potuto continuare ad essere utilizzate contemporaneamente all'avanzamento delle opere di ampliamento.

Anche in Australia sono stati portati avanti ingenti programmi di infrastrutturazione scolastica, con l'obiettivo di rispondere alla crisi legata al sovraffollamento delle scuole esistenti, soprattutto negli stati sud-occidentali più densamente urbanizzati di Victoria e New South Wales (NSW). Nel primo caso, la necessità di incrementare le dotazioni scolastiche è stata indirizzata dalla programmazione quinquennale 2021-2026 con la previsione di apertura di 100 nuove scuole. La costruzione dei nuovi edifici è promossa nell'ambito del programma **Permanent Modular School Building (PMSB)**, un piano di investimenti statali che ha l'obiettivo di potenziare le dotazioni edilizie scolastiche per contrastare gli effetti dell'incremento demografico. Dal punto di vista operativo, il PMSB punta sul ricorso all'uso di



Fig.34 - Unità modulari prefabbricate utilizzate per la realizzazione di interventi di edilizia scolastica nell'ambito del programma PMSB (Credits: University of Melbourne: <https://pursuit.unimelb.edu.au/articles/building-the-prefab-schools-of-the-future>)



Fig.35 - Interno di uno spazio educativo realizzato nell'ambito del programma PMSB (Credits: © Dianna Snape da University of Melbourne: <https://pursuit.unimelb.edu.au/articles/building-the-prefab-schools-of-the-future>)

tecniche costruttive con gradi elevati di prefabbricazione (fino all'80% dell'assemblaggio *off-site* dei componenti costruttivi) quale strategia prioritaria per assicurare la qualità costruttiva e prestazionale dei nuovi edifici, riducendo al contempo tempi e costi di intervento fino al 50% rispetto a tecniche costruttive tradizionali (Victorian School Building Authority, n.d., 2020). Le scuole emergenziali realizzate finora nell'ambito del PMSB sono edifici innovativi, caratterizzati da performance paragonabili o superiori a quelle delle costruzioni esistenti, con elevata durabilità e ridotto impatto del ciclo di vita (Figg.34-35).

Nello Stato del NSW invece, il sovraffollamento delle infrastrutture scolastiche è stato affrontato con la **State Infrastructure Strategy 2018-2038 (SIS)**, uno strumento ventennale di programmazione degli investimenti che ha lo scopo di indirizzare gli interventi su tutte le infrastrutture strategiche del Paese per sostenere la crescita socio-economica. Nella cornice della SIS, l'edilizia scolastica ha assunto una posizione di centralità come strumento di supporto alla sostenibilità del progresso nazionale; si tratta perciò di migliorare le condizioni di apprendimento per sostenere la crescita socio-economica delle nuove generazioni, anche attraverso la diffusione di spazi scolastici innovativi e all'avanguardia. Gli interventi di realizzazione delle nuove scuole sono portati avanti nell'ambito del preesistente **School Assets Strategic Plan (SASP)**, un piano con il quale si individuano le linee strategiche di azione e investimento statale fino al 2031. In dettaglio, il piano agisce secondo due principali linee di intervento, entrambe connotate dall'uso di tecniche di costruzione basate sulla prefabbricazione per la realizzazione delle nuove infrastrutture. Da un lato, viene prevista la predisposizione di spazi scolastici di breve utilizzo, da mantenere in uso per un periodo massimo di sette anni per rispondere alle situazioni più urgenti di rischio; dall'altro, si prevede la realizzazione di edifici scolastici più duraturi, ovvero con un ciclo di utilizzo sostanzialmente maggiore (Audit Office of NSW, 2017) (Fig.36). In entrambi i casi, il ricorso a tecniche di prefabbricazione consente di ridurre l'impatto economico-ambientale degli interventi, riducendo fino al 40% i rifiuti prodotti dalle costruzioni, migliorando la qualità degli edifici e riducendo di conseguenza i costi associati alla gestione e manutenzione (Newton *et al.*, 2018). Le nuove infrastrutture dedicano inoltre una particolare attenzione agli aspetti di qualità ambientale e spaziale; le nuove scuole sono infatti progettate in sinergia con l'applicazione del Future Learning, un *framework* di programmazione degli obiettivi pedagogici elaborato nel 2012 in Nuova Zelanda dal Ministero dell'Educazione (Bolstad *et al.*, 2012). I contenuti definiscono i target per l'apprendimento e gli indirizzi metodologici-operativi per la didattica, e individuano una serie di criteri progettuali da integrare nelle nuove scuole per garantire il rispetto di requisiti funzionali coerenti con le più recenti istanze pedagogiche. Nello specifico, i paradigmi progettuali sono orientati ai concetti di flessibilità, adattabilità e personalizzazione dello spazio, nonché di inclusività per utenze con bisogni educativi speciali e/o esigenze personali specifiche. A questo proposito, è però interessante notare come l'applicazione dei principi progettuali del Future Learning sia riservato alle scuole di cui si prevede un ciclo di utilizzo superiore a sette anni, escludendo le infrastrutture di più breve utilizzo dalla necessità di integrare tali indirizzi (Newton *et al.*, 2011). Una scelta che si ritiene si ponga in contrasto con gli obiettivi di sviluppo pedagogico, dal momento che i sette anni stimati per l'uso delle soluzioni a breve termine corrispondono comunque ad un intero ciclo di studi per uno studente, durante i quali ogni stimolo è fondamentale per promuovere un corretto sviluppo delle capacità cognitive, personali e relazionali degli alunni.

Anche negli Stati Uniti l'effetto della crescita demografica, concentrata soprattutto nei grandi agglomerati urbani, ha prodotto negli ultimi decenni una pressione crescente sulle infrastrutture scolastiche pubbliche, che oggi risultano in gran parte sovraffollate e quantitativamente insufficienti a rispondere alle richieste di iscrizione (Graves, 2010). Per far fronte a questa condizione, da diversi anni si è promossa l'articolazione del calendario secondo l'ap-



Fig.36 - La Jordan Springs Public School è uno degli interventi di edilizia scolastica realizzati nell'ambito della SIS dello stato nel NSW (Australia); la costruzione è avvenuta facendo ricorso a tecnologie costruttive prefabbricate (Credits: NWS Government, Department of Education: <https://www.schoolinfrastructure.nsw.gov.au/>)

proccio “*multi-track year*”, ovvero con una turnazione delle attività didattiche per tutto l’anno solare per diminuire il numero di presenze contemporanee negli edifici; una soluzione che spesso è stata però messa in relazione con un calo del rendimento scolastico da parte degli studenti e anche della produttività degli insegnanti (Shah e Inamullah, 2016). La soluzione alternativa messa in campo per la gestione delle emergenze infrastrutturali scolastiche è la realizzazione di nuovi spazi, che operano in complementarietà con le strutture esistenti per accogliere un numero maggiore di studenti, allestiti attraverso il ricorso a soluzioni prefabbricate (*portable classrooms*) che possono essere rapidamente installate negli spazi esterni dei cortili scolastici e, all’occorrenza, ricollocate in altre scuole (Modular Building Institute, 2014b). Nel contesto statunitense, un esempio virtuoso nella programmazione di questi interventi è stata quella promossa dallo Stato del New Jersey. Nel 2012, la School Development Authority ha avviato il **Modular School Program** per la realizzazione di interventi di nuova edilizia scolastica che potessero integrare le infrastrutture esistenti per alleviare il sovraffollamento. Il programma ha adottato un approccio *cost-effective* basato sull’uso di un kit di elementi costruttivi pre-verificati – in termini di caratteristiche tecnico-costruttive e di costo, da assemblare per realizzare, rapidamente e a basso costo, nuovi edifici scolastici. La standardizzazione morfologica e prestazionale ha riguardato un insieme di componenti per le strutture, le soluzioni di involucro e le sistemazioni esterne, nonché un set di regole ed elementi spaziali per gestire le aggregazioni progettuali. La scalabilità e ripetibilità del processo sono state indirizzate rilasciando il *Materials & Systems Standard Manual* e il *Construction Detail Manual*, due manuali-guida che unificano i componenti edilizi, impostano le regole per la loro aggregabilità e identificano i parametri e *benchmark* qualitativi per la verifica delle soluzioni. La standardizzazione e la logica per “kit di montaggio” vengono proposti come strumenti di garanzia dell’efficacia e della sostenibilità dell’intero processo edilizio, poiché consentono di vincolare gli interventi all’impiego di materiali selezionati per la loro durabilità, qualità ed eco-compatibilità, di poter predeterminare la rispondenza ai vincoli di budget, nonché di velocizzare le operazioni di progettazione, verifica e realizzazione

degli interventi (State of New Jersey, 2012).

Una strategia analoga è quella messa in campo dal **Plan Selva**, un programma di edilizia scolastica promosso dal Ministero dell'Educazione del Perù a partire dal 2013 con lo scopo di migliorare le condizioni di apprendimento nel Paese, in particolare nelle aree più remote dell'Amazzonia peruviana. Il progetto è stato sviluppato da un gruppo di lavoro ministeriale coordinato da Elizabeth Añaños, ed è stato presentato con il titolo di *Our Amazon Frontline* all'interno del Padiglione del Perù alla XV Biennale di Venezia, *Reporting From the Front* (Venezia, 2016). Plan Selva ha preso avvio a partire dagli esiti del Censo Escolar (2013), una campagna di censimento dello stato delle infrastrutture scolastiche nazionali, i cui risultati hanno delineato uno scenario di estrema vulnerabilità dei sistemi educativi. Difatti, a causa della scarsità di infrastrutture, la maggioranza della popolazione in età scolare è costretta a spostarsi verso i villaggi vicini per frequentare la scuola, con tempi di spostamento a piedi variabili da cinque ore a due giorni. Inoltre, su un totale di 15'176 scuole censite, di cui solo il 14% localizzate in aree urbanizzate, a malapena il 15% dispone di servizi essenziali come acqua, energia elettrica e sistemi fognari, e la metà del patrimonio edilizio dimostra un'acuta vulnerabilità nei confronti degli eventi climatici estremi, con il 50% delle scuole rilevate soggetto a rischio elevato di inondazione (MINEDU, 2013). Il programma Plan Selva si è proposto di intervenire sulle infrastrutture educative con lo scopo di garantire un accesso equo e diffuso ai sistemi scolastici, anche con l'obiettivo a lungo termine di ristabilire la dignità delle popolazioni indigene e supportare lo sviluppo economico-sociale delle comunità rurali. Analogamente all'esempio precedente, anche il programma Plan Selva ha previsto la messa a punto di un "kit di componenti" a catalogo (strutture, sistemi di involucro di chiusura, arredi) improntati a principi di facilità e rapidità di assemblaggio, grazie all'uso di un numero limitato di elementi prefabbricati e di connessioni standardizzate, nonché di aggregabilità spaziale secondo schemi funzionali *ready-to-use*, flessibili e adattabili, usati per configurare aule, laboratori, spazi collettivi, dormitori e servizi (Fig.37). Il modello che ne è derivato dimostra elevati potenziali di scalabilità e replicabilità su vasta scala, oltre che di declinabilità locale del progetto secondo tecniche, materiali e risorse disponibili. A causa della limi-

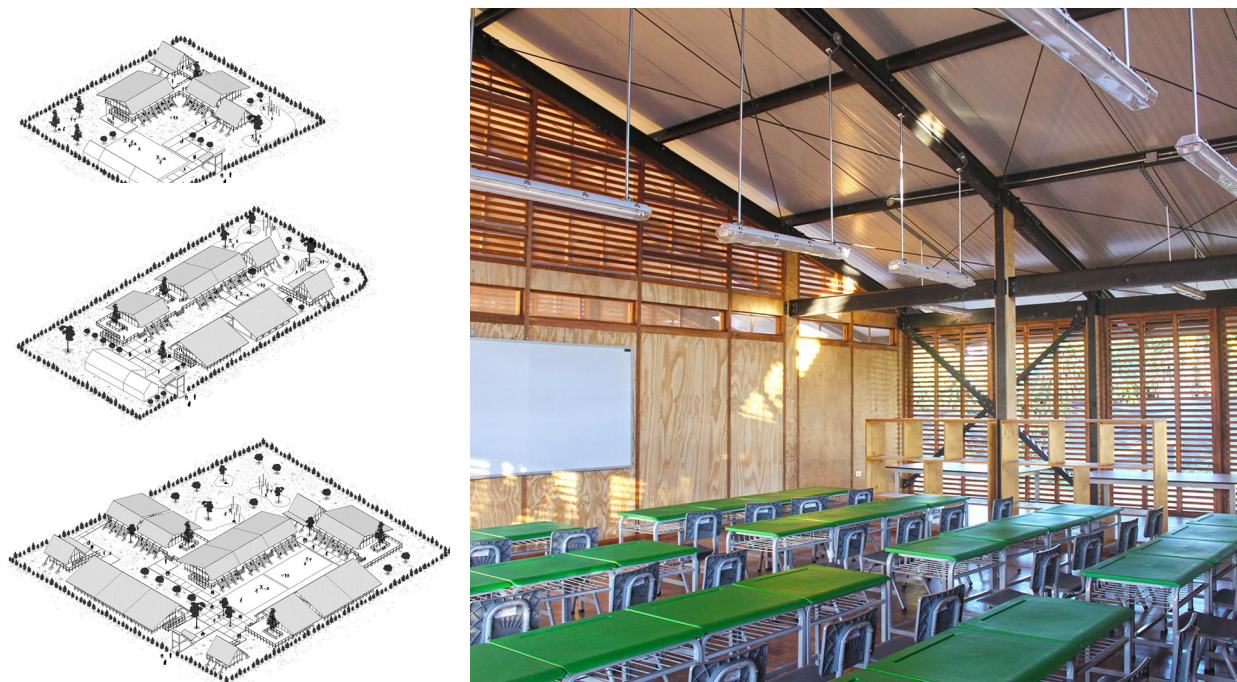


Fig.37 - Aggregabilità del sistema costruttivo sviluppato per il progetto Plan Selva; vista interna di uno spazio destinato ad attività scolastiche (Credits: Ministerio de Educación del Perú, Gruppo Plan Selva Infraestructura: Elizabeth Añaños Vega (Coordinatore), Claudia Flores, Sebastián Cilloniz, José Luis Villanueva, Migueo Chávez, Jino Fernández, Alfonso Orbegoso, Alvaro Echevarría, Militza Carrillo, Karel van Oordt, Daisuke Izumi, Alejandro Torero e Carlos Tamayo)

2. Dal 1999, fondatore e CEO di Architecture for Humanity.

3. Dal 2012, anno della sua costruzione, il campo profughi di Za'atari è progressivamente evoluto fino a diventare un insediamento "stabile". Suddiviso in 12 distretti, il campo occupa una superficie di circa 5 km² e attualmente rappresenta la quarta "città" più grande della Giordania. Nel 2013, nel momento di massima emergenza, il campo ha ospitato fino a 150'000 persone, una parte delle quali successivamente ricollocate in un secondo campo realizzato a 20 km ad est di quello di Za'tari (Oxfam, n.d.).

tatezza di mezzi e risorse, gli aspetti di qualità ambientale sono stati controllati attraverso l'integrazione di strategie passive, quali ventilazione naturale e modulazione dell'illuminazione naturale, che garantissero il comfort indoor e minimizzassero contemporaneamente l'uso di sistemi attivi (Saavedra, 2016).

Un ulteriore esempio viene dalla Giordania, ancora oggi uno dei Paesi maggiormente coinvolti nella gestione della crisi umanitaria provocata dalla guerra in Siria, che accoglie nei propri campi profughi i milioni di cittadini siriani fuggiti dal conflitto. In questo scenario si inserisce il programma **Rebuild**, un'iniziativa privata promossa dall'associazione italiana Building Peace Foundation con la partecipazione di enti pubblici e non-governativi, tra cui l'ONU, UNICEF e Save the Children e con il coordinamento di Cameron Sinclair² e Pouya Khazaeli. Il progetto è stato avviato nel campo profughi di Za'atari, un insediamento semi-informale costruito nel 2012 nel nord della Siria che ospita attualmente circa 80'000 cittadini sfollati³. Il programma Rebuild si è posto come obiettivo la realizzazione di infrastrutture di supporto all'educazione per la popolazione che risiede nel campo Za'atari, con la prospettiva di contrastare la dispersione scolastica dovuta allo sfollamento e offrire opportunità di crescita e sviluppo alle giovani generazioni siriane. Al fine di ottimizzare le risorse a disposizione e di promuovere strumenti strategici e operativi replicabili, il progetto Rebuild ha previsto la messa a punto di una tecnologia costruttiva informata da un approccio *low-tech*, ovvero di un sistema di componenti facilmente e rapidamente assemblabili da parte di manodopera non specializzata, basato sull'uso di elementi strutturali in acciaio recuperati da ponteggi e chiusure realizzate con gabbie metalliche riempite di inerti (Fig.38). Con questo sistema è possibile, per un team di dieci persone e impiegando due sole settimane, realizzare un'intera aula scolastica (Building Peace Foundation, n.d.). Nel progetto delle nuove aule, grande attenzione è dedicata al tema della qualità degli spazi, integrando tecniche passive di controllo ambientale e utilizzando sistemi costruttivi che, seppur a ridotto contenuto tecnologico, garantiscono la rispondenza delle performance di involucro alle specificità del clima (elevato potere isolante e inerzia termica). L'impatto delle nuove costruzioni è stato ulteriormente minimizzato attraverso l'uso di materiali naturali, riciclati e riciclabili,



Fig.38 - Il sistema costruttivo sviluppato nell'ambito del programma Rebuild utilizzato per la realizzazione di due edifici del Makani Remedial Educational Center (2016) nel campo Za'atari in Giordania (Credits: Foto Tassotto&Max © Building Peace Foundation)

provenienti da fonti locali e approvvigionabili direttamente in loco. Un esempio di come, anche nell'emergenza e nella scarsità di risorse, la sperimentazione tecnologica sul tema della prefabbricazione edilizia possa offrire soluzioni valide e sostenibili, capaci di interpretare con sensibilità le fragili esigenze dell'utenza e di educarle ad una cultura consapevole dell'uso delle risorse.

Il panorama delle esperienze internazionali messe in campo per fronteggiare le emergenze relative all'edilizia scolastica delinea un quadro di programmazione internazionale in cui il tema della prefabbricazione edilizia si configura quale approccio funzionale a indirizzare obiettivi di qualità e sostenibilità delle infrastrutture (Tab.01). Le azioni intraprese da tali programmi permettono di osservare come tali modalità operative consentano di rispondere alle molteplici esigenze di rapidità, economicità, reversibilità degli interventi e ottimizzazione delle risorse nel processo edilizio. Il riconoscimento dei risultati resi possibili dalle strategie di industrializzazione edilizia sta avvenendo anche nel nostro Paese. A tale proposito, è significativa la recente notizia che l'attuale Presidente del Consiglio dei Ministri italiano, Mario Draghi, ha avviato un dialogo con alcuni dei più influenti architetti italiani, tra cui Renzo Piano (1937), per promuovere un vasto programma di realizzazione di nuovi edifici scolastici attraverso l'uso di tecnologie edilizie prefabbricate, commissionando ai professionisti del settore della progettazione la messa a punto di modelli innovativi di unità scolastiche modulari, facilmente e rapidamente aggregabili e installabili per rispondere alla necessità urgente di intervento e sostituzione del patrimonio edilizio scolastico nazionale (Orazi, 2021). L'intenzione del governo italiano è dunque quella di fare leva su un approccio diverso alla costruzione, importando modelli di successo da paesi quali Francia e Germania, per rispondere ad una problematica sempre più incalzante, ovvero quella della vulnerabilità delle infrastrutture educative, predisponendo un modello-prassi virtuoso e sostenibile, da scalare su tutto il territorio nazionale.

La messa a punto di modelli progettuali adattabili e replicabili risulta una strategia efficace a razionalizzare gli sforzi – progettuali, costruttivi ed economici – necessari per fronteggiare le problematiche emergenziali dei tessuti infrastrutturali scolastici. Il tema è già da molti anni oggetto di sperimentazioni, che hanno prodotto un vasto repertorio di soluzioni tecnico-progettuali; tuttavia, solo un numero limitato di esperienze è riuscito a consolidarsi sul mercato come proposta stabile per la realizzazione degli interventi in emergenza. Un'ulteriore messa a fuoco rispetto a questo ambito di sperimentazione si ha dallo studio delle esperienze maturate a livello nazionale ed estero, perciò dalla ricognizione dei processi di progettazione e/o realizzazione di unità scolastiche per l'emergenza, dei quali il capitolo successivo indaga metodi, approcci e soluzioni per individuarne potenzialità e cause di insuccesso.

Tab.01 - Quadro sinottico dei piani e programmi internazionali di infrastrutturazione scolastica

Programma	Obiettivo	Fondi	Strategie	Risultati	Stato
UK , Building Schools For the Future (BSF), 2005-2010	Riqualificazione e sostituzione del patrimonio edilizio scolastico	55 milioni £ (65 milioni € ca.) Fondi governativi	---	Insostenibilità economica degli interventi, causata dalla dilatazione incontrollata di tempi e costi di realizzazione	Terminato nel 2010; realizzato un quinto degli interventi, 231 scuole lasciate in costruzione e 1000 da realizzare
UK , Priority School Building Program (PSBP), <i>in corso</i>	Riqualificazione e sostituzione del patrimonio edilizio scolastico	---	---	Realizzazione di edifici con elevati consumi energetici (fino a +191%), spazi ridotti fino al 15% rispetto alle strutture esistenti, dilatazione di tempi e costi delle opere	Realizzate solo 30 delle 261 scuole previste entro i primi tre anni del programma
		1100€/m ² (1300 €/m ² ca.) Fondi governativi	(Il fase del programma): incoraggiato l'utilizzo di soluzioni progettuali semi-standardizzate e di tecnologie costruttive prefabbricate	Riduzione fino al 40% dei tempi di realizzazione delle opere, riduzione dell'interferenza dei cantieri	<i>In corso di realizzazione</i>
AU , Permanent Modular School Building (PMSB), <i>in corso</i>	Potenziamento delle infrastrutture scolastiche del paese; previsione di apertura di 110 scuole in cinque anni	Fondi governativi	Ricorso a tecniche costruttive basate sulla prefabbricazione, fino all'80% dell'assemblaggio <i>off-site</i> dei componenti edilizi	Riduzione fino al 50% dei tempi e dei costi delle opere rispetto a tecniche tradizionali; realizzazione di edifici innovativi, con elevate prestazioni energetiche e ridotto impatto ambientale	<i>In corso di realizzazione</i>
AU , School Assets Strategic Plan, <i>in corso</i>	Potenziamento delle infrastrutture scolastiche del paese	Fondi governativi	Ricorso a tecniche costruttive basate sulla prefabbricazione per la realizzazione di edifici con breve e medio periodo ciclo di utilizzo; applicazione del Future Learning	Riduzione fino al 40% dei rifiuti prodotti dalle costruzioni	<i>In corso di realizzazione</i>
USA , Modular School Program, <i>in corso</i>	Potenziamento delle infrastrutture scolastiche per alleviare la pressione del sovraffollamento	Fondi governativi	Utilizzo di un kit di elementi costruttivi standardizzati e pre-verificati, accompagnato dalla redazione di due manuali-guida per la progettazione architettonico-spaziale degli edifici	Riduzione dei costi delle opere, realizzazione di edifici con elevati standard qualitativi (materiali eco-compatibili, opportuni livelli di salubrità dell'aria, ecc.)	---

Perù , Plan Selva, <i>in corso</i>	Potenziamento delle infrastrutture scolastiche per raggiungere le comunità marginalizzate	Fondi governativi	Sviluppo di un kit di componenti standardizzati e di una serie di aggregazioni "ready-to-use", combinabili sulla base di regole di coordinazione modulare; integrazione di strategie passive per il controllo ambientale	Realizzazione di scuole in contesti ad elevata marginalità e fragilità territoriale e sociale. Le scuole vengono realizzate in breve tempo e garantiscono ottimi livelli di comfort per gli studenti	<i>In corso di realizzazione</i>
Giordania , ReBuild, <i>in corso</i>	Realizzazione di scuole emergenziali nel campo di accoglienza di Za'atari	Fondi governativi Fondi privati	Utilizzo di tecnologie costruttive <i>low-tech</i> , reversibili, auto-costruibili e basate sull'impiego di materiali naturali, locali e riciclabili	Le scuole vengono realizzate in auto-costruzione dalla comunità, attivando forme di cooperazione sociale; le tecnologie costruttive garantiscono ottimi livelli di comfort per l'utenza	<i>In corso di realizzazione</i>

3.2. Ricerche e *best-practices* internazionali sulle architetture scolastiche di emergenza

Fino dai primi anni Duemila, diverse ricerche internazionali si sono occupate dello sviluppo di modelli progettuali e prototipali finalizzati alla gestione delle contingenze emergenziali legate all'edilizia scolastica. Una delle prime ricerche è stata quella portata avanti nel 2001 dal **Lawrence Berkeley National Laboratory** (California, USA) con l'obiettivo di implementare nuovi modelli costruttivi per interventi di edilizia scolastica emergenziale, scalabili e replicabili su vasta scala. La ricerca è arrivata a definire quattro nuovi modelli innovativi di unità scolastica componibile, sviluppati in accordo a principi di sostenibilità e riduzione dell'impatto ambientale. È stato infatti previsto l'utilizzo di materiali selezionati e certificati per avere una ridotta emissività di sostanze inquinanti, nonché l'integrazione di sistemi impiantistici ad elevata efficienza, con l'obiettivo di garantire una corretta vivibilità degli spazi e la riduzione dei costi di gestione e manutenzione (Hodgson *et al.*, 2001).

Nello stesso periodo negli USA, un'iniziativa coordinata da un gruppo di ricerca del **Southern California Edison (SCE)**, ha intrapreso un percorso di ricerca rivolto alla riprogettazione dei tradizionali modelli di portable classrooms secondo principi di sostenibilità ambientale, qualità costruttiva e comfort. Con il coinvolgimento degli *stakeholders* pubblici e privati (California Energy Commission, California's Division of the State Architects, laboratori di ricerca nazionali, produttori di unità modulari) e degli utenti (alunni, insegnanti, genitori), è stato portato avanti un processo di co-progettazione di un innovativo modello di unità scolastica, ottimizzato nell'uso delle risorse, inclusivo, flessibile e adattabile nella sua articolazione spaziale (Ander *et al.*, 2003).

Più recentemente, nel 2012 l'**University of Kansas** ha sviluppato un progetto per un modello di unità scolastica emergenziale focalizzandosi sul tema della customizzazione progettuale. Nello specifico, il progetto è stato sviluppato secondo i principi dell'adattabilità climatica e della configurabilità dei *layout* tipologico-spaziali. Il concept è stato articolato come una scansione di unità ambientali a grado variabile di flessibilità (spazio aula, aggregabile e scalabile, spazi di supporto, ambienti di collegamento), per ciascuna delle quali è stato previsto un ventaglio di opzioni intercambiabili per la differenziazione e customizzazione dei sistemi di involucro, che possono essere declinati secondo le specifiche esigenze del contesto climatico (Gore, 2012) (Fig.39).

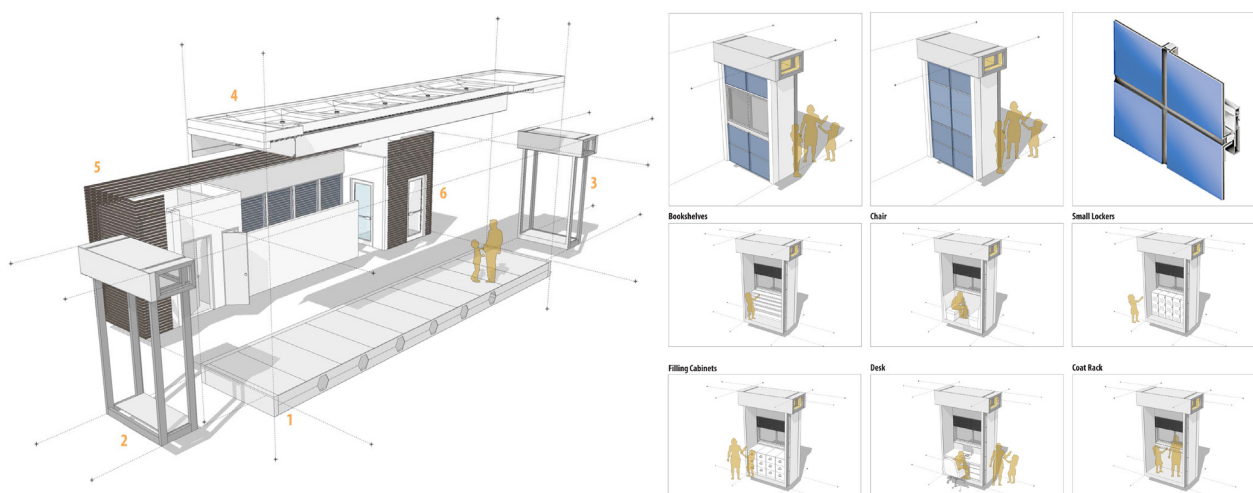


Fig.39 - Concept progettuale sviluppato dalla ricerca dell'University of Kansas per un sistema costruttivo prefabbricato e customizzabile da utilizzare per la realizzazione di edifici scolastici di emergenza (Credits: Gore, N. (2012) *Designing Better Portable Classrooms*. ACSA Fall Conference, 121–126)

Dal 2009, un ulteriore contributo è stato sviluppato nell'ambito della ricerca triennale **Australian Research Council Linkage Project: Future Proofing School**, svolta presso l'University of Melbourne (AU). Si è trattato di un progetto di ricerca-azione svolto da ricercatori accademici in collaborazione con innumerevoli *stakeholders* (produttori, studenti, insegnanti, designers) con l'obiettivo di integrare principi di sostenibilità nella realizzazione di spazi scolastici emergenziali, in particolare: l'impiego di materiali naturali e a ridotto impatto ambientale, l'uso di tecnologie innovative per il risparmio energetico, la progettazione di sistemi di involucro customizzabili, l'implementazione di una nuova concezione spaziale basata sulla flessibilità e sull'adattamento dello spazio alle istanze pedagogiche (Newton, 2009; Newton e Backhouse, 2012). Il primo risultato del progetto è stata la descrizione di un quadro esigenziale aggiornato da porre alla base della progettazione degli edifici scolastici, che mette a sistema gli aspetti architettonico-spaziali con quelli tecnico-costruttivi in ottica di sostenibilità e razionalizzazione delle risorse (Fig.40). Tali indirizzi hanno poi costituito l'input per la raccolta di idee progettuali, che è avvenuta attraverso un concorso di idee incentrato sulla definizione di nuovi archetipi progettuali per l'infrastrutturazione scolastica di emergenza. Gli esiti del concorso hanno prodotto un ricco panorama di soluzioni innovative, dimostrando come il progetto per l'emergenza possa costituire un campo di prova per sperimentare, in senso più ampio, le innovazioni sul tema della produzione industrializzata in chiave sostenibile: l'utilizzo di materiali innovativi e/o riconvertiti dalla tradizione costruttiva del luogo, a ridotto impatto sull'ambiente e circolari, l'impiego di tecniche costruttive reversibili che abilitano la dismibilità e/o l'incrementabilità dei manufatti secondo gli scenari di uso desiderati (Newton *et al.*, 2011, 2012a, 2012b; Newton e Cleveland, 2015).

21st Century Learning

- > student centred
- > self-directed
- > experiential
- > new technologies

Regenerative Design

- > neutral to positive
- > buildings as 3D textbooks
- > biodiversity issues
- > students leading action

Mass Customisation

- > customised solutions
- > adapted to client
- > adapted to site
- > design-led

Fig. 40 - Estratti dal bando per il concorso Future Proofing Schools, incentrato sull'integrazione di criteri di qualità spaziale e sostenibilità ambientale per la progettazione di modelli innovativi di edifici scolastici di emergenza (Credits: Newton, C., Backhouse, S., Fisher, K., Gan, L., Grose, M., Hes, D., Howard, P., Kvan, T., Monie, J., & Wilks, S. (2011) Future Proofing Schools. The Phase 1 Research Compilation. [Online] Available at: [https://minerva-access.unimelb.edu.au/bitstream/handle/11343/159099/Future Proofing Schools- Phase 1 Research Compilation.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://minerva-access.unimelb.edu.au/bitstream/handle/11343/159099/Future%20Proofing%20Schools-Phase%201%20Research%20Compilation.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (Accessed: 10th december 2021))

Materials, Waste

Materials

The materials used is a key consideration for the design and development of relocatable classrooms. There are inherent waste and efficiency opportunities that off-site manufacture presents.

It is important to consider the choice of materials, optimising re-use and recycling where possible and minimizing embodied energy - but not at the cost of maintainability, strength and longevity. Examples such as those of Eco Villages Worldwide and Gen 7 highlight innovative use of insulating materials.

Results from monitoring the internal temperatures of mini case study 4 highlight that current levels of insulation in Australian relocatable classrooms may be inadequate

Can the design be low in embodied energy (less than 100GJ/m²) and be able to be successfully relocated over a life span of 40 years?

Australian Case Studies

In an arid climate on a 43°C summer day, mini case study 4, a newly commissioned relocatable classroom orientated north-south with sunshading, R1.5 wall insulation and R1.8 ceiling insulation reached a maximum temperature of 43°C. Meanwhile, an older relocatable classroom on the same site with equal or lower R-values of insulation, orientated east-west with sunshading, reached a maximum temperature of 52°C.

Green Star: VOC

- VOC level guidance
- Paint – TVOC walls 14-16 g/L, trim 75 g/L, primer 30, latex 60, one or two pack 140 Other solvent based 200
 - Sealants meet TVOC – 50-100 g/L
 - Carpets – TVOC 0.5mg/m² per hour and 4-PC 0.05mg/m²
 - Fitouts – TVOC 0.5mg/item/hour
 - Formaldehyde – low to no – E0 to super E0
 - All materials, refrigerants, insulation materials have a zero ozone depleting potential and green warming potential under 10.

Green Star: Materials

- Use of post-consumer recycled to be 20% or greater;
- Reuse of materials - 2% or greater;
- Minimise Portland cement use; substitute with industrial waste such as flyash; use recycled aggregate;
- Steel should be 50% post consumer recycled steel or be reused;
- Minimise PVC usage;
- Timber should be FSC certified, post consumer recycled or reused.
- Design for ease of disassembly;
- Plan dematerialisation, for example minimise need for painting, ductwork, piping;
- Use durable flooring that is low maintenance, modular, low emission and low impact;
- Joinery and furniture to be low emission, durable, low maintenance, modular and low impact;
- Integrate space for recycled materials and waste materials for recycling.

Waste

There are two vital aspects associated with waste.

The first is in the design and construction of the classroom itself and choice of materials. (Information on 'emerging' materials is available on page 12.)

Using recycled and reclaimed materials shows an understanding of the value of materials. There is also value in ensuring that benefits in using prefabrication are part of the information that is passed on to the schools and teachers for them to use in their teaching. The German prefabricated timber house manufacturer Baufritz limits the waste of two large houses to two small skips (photo 3). Baufritz has developed an insulation product that uses the wood shavings from their own manufacturing processes.

The second important aspect associated with waste is ensuring that there is sufficient room in the classroom for the collection and storage of recyclables, compostables and materials for reuse.

Energy, Water

Green Star: Water

Rain water should be used to flush toilets and be a 5A standard – integrated rainwater collection.

Where possible, integrate with a teaching landscape.

Integrate meters and monitoring if water is being used.

Reduce potable water consumption from heat rejection systems by 50%, 90% or 100%, for example by using a geothermal coupled system to remove heat.

Integrate regionally appropriate low water vegetation – roof, wall, interior (refer to landscaping brochure and image 2 on page 12)

Can you make your building CO₂ positive in operation and water neutral with embodied energy paid back in ten years?

Water

Water efficiency is an important aspect of all new building designs in Australia. In southern parts of Australia it is not uncommon to have water tanks and water efficient fixtures incorporated into the design. In the school context, this creates opportunities for integrated learning where the tanks and the associated plumbing become teaching tools when made visible (see pages 9 & 10).

While it is common for relocatable classrooms to have running water, toilets are generally not integrated into the design and these classrooms are often not located in close proximity to toilet blocks.

An international study by Vernon *et al* (2003) into 9-11 year old student attitudes to school toilets found that inadequately located school toilets, along with bulging and lack of cleanliness, led to students not using the facilities and later suffering from dehydration, constipation, urinary tract infections or incontinence.

In a recent workshop, primary students in Queensland voted that the inclusion of a toilet was one of the top 10 things they would change about their current relocatable classroom.

Energy

Energy use in classrooms is mainly for HVAC (heating, ventilation, air cooling) systems, lighting and equipment.

To improve energy efficiency, consider how to design the building to reduce the heating and cooling loads on the HVAC system. This can be done through considering building orientation and external sun shading, wall and ceiling insulation with high R-values, double and triple glazed windows with low emissivity glass, white roofs and thermal breaks.

Building occupant behaviour will also have an impact on energy consumption. For example, in a temperate climate, the National Australian Built Environment Rating System recommends that rooms be heated to between 18-20°C in winter and cooled to between 24-27°C in summer. Every one degree higher in winter will increase energy usage by 15%, while every one degree lower in summer will increase energy usage by 10%.

Energy savings can also be made through maximising daylight, using energy efficient lighting, and ensuring that equipment is not left on standby power.

Solar Energy

Design the classroom so that the building can be placed at the correct orientation on any site to enable solar photo voltaic panels to be used on the roof. PV panels can be used to offset energy used by the classroom and, depending on the size of the array, may even generate solar credits for energy used elsewhere by the school.

Green Star: Energy

Aim for zero net production of CO₂, but try to limit energy use within each general purpose classroom.

Green star sets a benchmark of 108kgCO₂/m²/p.a., which varies depending on the function and location in Australia.

Green Star also gives credits for:

- the integration of energy monitoring & display energy use,
- putting in place strategies for peak energy demand,
- installing motion and light level sensors, and
- ensuring unoccupied areas have wider temperature ranges or are not air conditioned.

Negli stessi anni, presso l'**University of Sydney** (AU) è stato portato avanti un lavoro di ricerca teso a individuare un *framework* di azioni da implementare per migliorare la qualità delle infrastrutture scolastiche emergenziali. Il lavoro ha assunto come principi per la progettazione i tre pilastri della sostenibilità ambientale, economica e sociale, richiamando l'applicazione dei criteri del sistema di *rating* Green Building Council of Australia (GBCA) per la progettazione di spazi scolastici in emergenza. Le azioni-guida individuate riguardano l'utilizzo di tecniche costruttive prefabbricate ad elevata reversibilità, l'utilizzo di materiali eco-compatibili e basso-emissivi, nonché l'utilizzo di sistemi di involucro altamente prestazionali per ridurre i costi associati alla spesa energetica (Slee *et al.*, 2015; Slee e Hyde, 2014, 2015, 2016).

Obiettivi e strategie analoghe sono quelle che hanno informato il progetto inglese **SmartPOD**, esito di una ricerca sviluppata nel 2016 presso l'University of Derby (UK) e incentrata sulla verifica prestazionale di un modello di unità scolastica emergenziale. L'innovazione portata avanti dal progetto consiste nell'aver integrato strategie progettuali passive per il controllo ambientale, finalizzate a ridurre il consumo energetico e i costi associati alla gestione e manutenzione dei manufatti (Ceranic *et al.*, 2017, 2018) (Fig.41).



Fig.41 - Concept progettuale dell'unità scolastica SmartPOD (Credits: Ceranic, B., Beardmore, J., & Cox, A. (2017). *A Novel Modular Design Approach to "Thermal Capacity on Demand" in a Rapid Deployment Building Solutions: Case Study of Smart-POD*. Energy Procedia, 134, 776–786)

Nel 2019, in Inghilterra è stata sviluppata la ricerca **SEISMIC**, un progetto finanziato da UK Research and Innovation (UKRI) nell'ambito di Innovate UK- Industrial Strategy Challenge Fund: Transforming Construction. Il progetto ha inteso contribuire al programma di infrastrutturazione scolastica avviato a livello nazionale, che a sua volta si inserisce nella più ampia prospettiva della Construction 2025 Strategy, un programma quinquennale di obiettivi strategici, diretti al settore delle infrastrutture, per incrementare le capacità produttive e la competitività del settore AEC. Per rispondere ai limiti imposti dalla programmazione degli interventi, la ricerca SEISMIC ha previsto lo sviluppo un catalogo virtuale di unità modulari, che possono essere aggregate attraverso un'applicazione web⁴ per la progettazione di complessi scolastici. Il progetto ha messo a sistema l'uso di elementi costruttivi parzialmente standardizzati, comunque adattabili nell'aspetto e nelle prestazioni, con uno strumento *user-friendly* utilizzabile dai progettisti per portare avanti processi di co-design condivisi con l'utenza. La configurazione del progetto avviene a partire da un

4. Accessibile al link:
<https://seismic-school-app.io/>



Fig.42 - Esempio di funzionamento dell'applicazione web sviluppata dalla ricerca SEISMIC: attraverso la piattaforma è possibile aggregare un set di modelli digitalizzati di unità prefabbricate esplorandone le configurazioni spaziali, componendo il kit direttamente nel sito di intervento (Credits: Brydenwood da www.brydenwood.co.uk)

catalogo pre-impostato di spazi, pre-verificati nel rispetto della normativa del Department of Education, che vengono aggregati digitalmente sul lotto di intervento, scelto su una mappa interattiva Geo-referenziata (Fig.42). La soluzione scelta viene poi discretizzata e tradotta operativamente in un kit di componenti edilizi, parzialmente standardizzati e pre-verificati nelle prestazioni strutturali, che vengono prefabbricati dalle aziende partner del progetto. Attraverso la semplificazione delle fasi di progetto-verifica si è calcolata una riduzione dei tempi e dei costi di realizzazione fino al 25%. Il consorzio di ricerca ha previsto la partecipazione di attori del settore pubblico e privato: Blacc, il Manufacturing Technology Centre (MTC), lo studio Bryden Wood e due dei più importanti fornitori di tecnologie prefabbricate del Paese, Elliot e The McAvooy Group. La loro partnership ha consentito di capitalizzare i benefici delle tecnologie prefabbricate e renderle ampiamente disponibili sul mercato per abbattere i costi di ricerca e sviluppo in un'ottica di economia di scala. La soluzione tecnologico-strutturale alla base del kit di componenti è un'unità modulare in acciaio pre-ingegnerizzata, aggregabile con un numero limitato di connessioni uniformate e standardizzate. La razionalizzazione del sistema tecnologico ha permesso non solo di renderlo "pronto all'uso", ma anche di ottimizzare l'uso delle risorse materiali, ottenendo:

- L'incremento della produttività fino al 50%, grazie alla rapidità di assemblaggio in officina;
- La riduzione dei costi fino al 25% per l'intero processo di progettazione, produzione e installazione;
- La limitazione del numero di componenti utilizzati, con conseguente riduzione del peso e della quantità di materiale utilizzato (circa il 25% in meno);
- L'abbattimento fino ad un quarto delle emissioni di CO₂.

Allo stato attuale, il progetto è in fase di verifica e validazione per l'immissione sul mercato dei componenti standardizzati del processo; l'obiettivo di lungo raggio è l'applicazione dei principi della standardizzazione a tutto il sistema costruttivo, includendo anche i sistemi di chiusura e finitura, in modo da massimizzare i benefici tecnici ed economici

derivanti dall'uso di elementi pre-validati.

Le esperienze di ricerca e sperimentazione che emergono dall'analisi dello stato dell'arte (Tab.02) si dirigono quindi verso di nuovi modelli e archetipi costruttivi per edifici scolastici emergenziali che, partendo dai consolidati potenziali delle tecniche di prefabbricazione, vi integrano considerazioni in merito alla sostenibilità economico-ambientale del ciclo di vita dei manufatti, e promuovono una progettualità tipologico-spaziale più articolata, in grado di sostenere gli intenti pedagogico-educativi contemporanei.

Ciononostante, allo stato attuale si rileva una difficoltà, da parte di questi esempi, nel consolidarsi sul mercato; seppure il panorama di esperienze progettuali sia ricco di proposte con contenuti di innovazione, solo un limitato numero di soluzioni architettonico-costruttive è riuscito infatti ad affermarsi oltre lo stadio prototipale. Le ragioni sono da ricercare inizialmente in uno svantaggio, in termini di comparazione economica, rispetto a prodotti standardizzati già reperibili sul mercato per altre applicazioni (per esempio unità containerizzate per cantieri, allestimenti sportivi, ecc.), distribuiti da aziende che assicurano una copertura capillare sul territorio. Gli investimenti iniziali per la ricerca e sviluppo di soluzioni maggiormente qualitative contribuiscono ad incrementare il costo di acquisto rispetto a prodotti già distribuiti sul mercato, favorendone la scelta per ragioni economiche e di rapidità di fornitura. Alla luce di quanto emerso dall'analisi del quadro conoscitivo preliminare, il parametro economico deve però leggersi in chiave di *valore* in relazione all'intero ciclo di vita dei manufatti, in cui rientrano innumerevoli costi indiretti, spesso nascosti, che accrescono l'entità delle risorse a carico delle amministrazioni pubbliche a cui spetta la gestione dei manufatti: spese di manutenzione, costi energetici, spese di dismissione e conferimento dei materiali in discarica. In ottica di valutazione *life-cycle*, un approccio peraltro reso cogente per gli appalti delle opere pubbliche, la selezione delle alternative deve avvenire secondo una visione sistemica degli interventi, che analizza le innumerevoli ricadute economico-ambientali derivanti dalle scelte progettuali favorendo l'adozione di quelle maggiormente sostenibili e che assicurano la compatibilità ambientale. Per garantire l'accettabilità delle proposte sotto il profilo economico, la progettazione deve avvenire di concerto con gli esperti della produzione, a cui spetta il compito di indirizzare le scelte tecnico-costruttive per ottimizzare materiali, tempi e costi di produzione. A questo proposito, è significativo il successo dimostrato dalla ricerca inglese SEISMIC, che ha previsto – fin dalle fasi iniziali di concettualizzazione – la collaborazione sinergica con aziende del settore della produzione edilizia, che hanno avuto il compito di definire i vincoli e le invarianti da rispettare, in fase di progetto, per razionalizzare le risorse, allineando l'offerta alle richieste della committenza pubblica.

Tab.02 - Quadro sinottico delle ricerche sviluppate sul tema delle architetture scolastiche di emergenza

Ricerche		Bibliografia di riferimento
USA, 2001 Lawrence Berkeley National Lab.	Sviluppo e verifica prestazionale di quattro proposte progettuali per unità scolastiche emergenziali ad elevata efficienza energetica, realizzate impiegando materiali a ridotta emissività di inquinanti.	Hodgson <i>et al.</i> , 2001 Hodgson <i>et al.</i> , 2004
USA, 2003 Southern California Edison (SCE)	Sviluppo di una proposta progettuale per un modello innovativo di aula scolastica di emergenza, realizzata attraverso un processo partecipativo di co-design con <i>stakeholders</i> e utenti (studenti, insegnanti, genitori).	Ander <i>et al.</i> , 2003
USA, 2012 University of Kansas	Sviluppo di un modello di unità scolastica emergenziale ad elevata adattabilità climatica e variabilità delle soluzioni architettonico-spaziali.	Gore, 2012
AU, 2009-2011 Australian Research Council Linkage Project Future Proofing Schools	Sviluppo di proposte progettuali che integrino criteri di sostenibilità ambientale, in particolare l'uso di tecnologie innovative per il risparmio energetico, materiali a ridotto impatto del ciclo di vita e sistemi di involucro con prestazioni customizzabili.	Newton, 2009 Newton e Backhouse, 2012 Future Proofing Schools, 2011 Newton e Cleveland, 2015
AU, 2014 University of Sydney	Individuazione di un <i>framework</i> di azioni da implementare per il potenziamento della qualità delle infrastrutture scolastiche di emergenza, richiamando l'applicazione del sistema di <i>rating</i> GBCA.	Slee <i>et al.</i> , 2015 Slee e Hyde, 2014 Slee e Hyde, 2015 Slee e Hyde, 2016
UK, 2017 University of Derby, SmartPOD	Progettazione e verifica prestazionale di un modello di unità scolastica di emergenza che integra strategie passive per il controllo ambientale, finalizzate a ridurre i consumi energetici e i costi gestionali.	Ceranic <i>et al.</i> , 2017 Ceranic <i>et al.</i> , 2018
UK, 2019 SEISMIC	Sviluppo di una piattaforma <i>web</i> per la configurazione di progetti di edilizia scolastica, connessa ad un kit di elementi costruttivi standardizzati e pre-verificati forniti dai costruttori partner del progetto.	SEISMIC, n.d.

3.3. Analisi di casi studio

Per completare il quadro inerente allo stato dell'arte sul tema delle infrastrutture scolastiche di emergenza, il lavoro di indagine ha previsto la ricognizione e l'analisi critica di progetti e interventi di realizzazione di spazi scolastici emergenziali. La chiave di lettura che ha guidato l'analisi dei casi studio è stato quello della sostenibilità delle proposte. La rilevanza che il tema assume nella programmazione strategica per il settore AEC, unita agli indirizzi promossi dalle normative per l'edilizia pubblica, rendono ormai improrogabile l'applicazione di principi di qualità, eco-compatibilità e uso consapevole delle risorse all'interno dei processi di realizzazione di nuovi edifici scolastici. A partire da tale riflessione, l'analisi dei casi studio ha avuto l'obiettivo fotografare lo stato dell'arte rispetto al raggiungimento di questi obiettivi. L'intento trasversale dell'analisi è stato anche quello di mettere a fuoco i metodi, le tecniche e gli approcci di intervento, nel contesto italiano e internazionale, quindi di operare una comparazione tra le esperienze nazionali ed estere per mettere in luce le criticità e domande di ricerca aperte, estrapolando in positivo dalle *best practices* gli indirizzi metodologici e strategici da porre a guida delle future sperimentazioni sul tema. Con queste premesse, i casi studio sono stati selezionati sulla base di una serie di criteri di carattere generale, che permettessero di indirizzare gli obiettivi prefissati dall'analisi, e nello specifico:






- Finestra temporale: si sono selezionati i progetti realizzati negli ultimi 20 anni, ritenendo che le esperienze prodotte entro questo periodo potessero fornire elementi di innovazione, sia sul piano delle tecnologie costruttive che degli approcci alla progettazione architettonico-spaziale di ambienti di apprendimento;
- Destinazione funzionale e contesto di intervento: sono state selezionate quelle esperienze che si inserivano in ambiti di intervento caratterizzati da scenari di tipo emergenziale, come contesti post-disastro, aree connotate da rapida urbanizzazione, aumento demografico e conseguente sovraffollamento delle scuole, interventi di riqualificazione di scuole esistenti e/o condizioni di inagibilità delle strutture per presenza di rischi strutturali;
- Tecniche di messa in opera: le casistiche analizzate sono accomunate dall'uso di tecnologie costruttive ad elevato grado di prefabbricazione, con particolare attenzione a quelle che impiegano tecniche reversibili per l'ancoraggio al suolo e/o l'assemblaggio dei componenti, per garantire la dismissibilità dei manufatti e il ripristino delle aree di intervento;
- Uso razionale ed efficiente delle risorse: particolare attenzione è stata posta alla ricognizione di progetti che dimostrassero un utilizzo consapevole delle risorse naturali, in particolare rispetto alla selezione di materiali eco-compatibili e circolari e/o all'integrazione di sistemi per lo sfruttamento delle energie rinnovabili;
- Qualità spaziale: le casistiche analizzate sono state selezionate rispetto a quelle che presentavano elevate qualità architettoniche e/o di distribuzione spaziale, anche attra-

verso l'integrazione di specifici accorgimenti di carattere pedagogico-didattico.

Gli esempi selezionati sono stati analizzati secondo parametri descrittivi e qualitativi, messi a punto attraverso un'indagine preliminare dei progetti stessi, e successivamente articolati in una scheda sintetica di lettura che ne facilitasse la catalogazione, la lettura e la successiva comparazione. Nello specifico, per ognuno dei casi analizzati le schede riportano:

- **Nome progetto**
- **Parole chiave:** vengono riportate una serie di icone rappresentative degli elementi di interesse del progetto, in modo da permettere la navigazione tra le diverse schede secondo le tematiche di interesse, secondo le corrispondenze individuate nella Tabella 03;

Tab.03 - Parole chiave per la lettura sintetica dei casi studio

Parole chiave				
				
Semplicità e rapidità di esecuzione, anche con l'ausilio di manodopera non specializzata e mezzi ordinari	Reversibilità dell'intervento	Efficienza energetica	Utilizzo di materiali naturali, eco-compatibili e a ridotto impatto	Flessibilità e customizzabilità della soluzione architettonico-edilizia

- **Progettista e/o azienda**
- **Anno e luogo di intervento**
- **Scopo dell'intervento:** il campo chiarisce quale è l'ambito e il contesto di intervento, ovvero il programma/quadro esigenziale a cui risponde;
- **Costo di realizzazione;**
- **Tempi di realizzazione;**
- **Descrizione e analisi del progetto:** viene descritto sinteticamente il progetto, seguito dall'analisi delle principali caratteristiche di sostenibilità adottate. La descrizione del progetto è articolata secondo una serie di categorie di informazioni, ovvero:
 - Descrizione generale;
 - Concept architettonico-spaziale;
 - Tecnologia costruttiva;
 - Sistema di attacco a terra;
 - Strategie di produzione industrializzata;
 - Strategie per la sostenibilità ambientale.

La ricerca dei dati è stata sviluppata attraverso indagine e ricognizione bibliografica (riviste, pubblicazioni, siti web), e integrando le informazioni con il materiale fornito direttamente dai progettisti e/o aziende contattate.

I casi studio analizzati sono (in ordine cronologico):

- CS 01.**Ampliamento del Villaggio scolastico di Pontedera (2019);
- CS 02.**Scuola Secondaria di Secondo grado "Paladini e Civitali" (2018);
- CS 03.**Lavington ECO Classroom (2016);
- CS 04.**Sawley Junior School (2016);
- CS 05.**Waldorf Elementary School (2014)
- CS 06.**Energy-Positive Relocatable Classroom (2014)
- CS 07.**Perkins SEED Classroom (2014)
- CS 08.**Sprout Space™ (2013)
- CS 09.**Scuola Secondaria di Secondo grado "M. Malpighi" (2012)
- CS 10.**Edificio Scolastico Temporaneo (EST) Mantovani e Gonnelli (2012)
- CS 11.**Gen7 Brentwood School (2011)
- CS 12.**Bertschi School Living Lab (2011)
- CS 13.**Harvard Yard Child Care Center (2009)
- CS 14.**Het4e Gymnasium (2008)
- CS 15.**Westborough Primary School Cardboard Building (2002)

CS.01 Ampliamento del Villaggio Scolastico di Pontedera (PI)



Fig.43 - Vista esterna dell'ampliamento del Campus scolastico di Pontedera realizzato attraverso l'installazione di unità modulari pre-assemblate (Credits: Modulcasaline: www.modulcasaline.com)

Dati

Progettista/azienda	Modulcasa Line
Luogo	Pontedera (PI), Italia
Anno	2019
Tipo di intervento	Ampliamento di breve periodo
Tempi di realizzazione	430 000 €
Costo dell'intervento	60 giorni

Descrizione

Il Villaggio Scolastico di Pontedera (PI) ospita una popolazione studentesca di circa 5300 alunni, un numero in progressivo aumento a causa dell'espansione dei programmi educativi e della crescita demografica nell'area limitrofa. Nei prossimi 8 anni è stata infatti prevista una crescita della popolazione scolastica di ulteriori 511 studenti, ovvero 50 classi in più rispetto a quelle attuali. Nonostante la saturazione degli edifici esistenti e la riorganizzazione degli spazi disponibili, al Campus scolastico mancavano ancora aule sufficienti per accogliere l'inizio del nuovo anno accademico. Per questo motivo, la Provincia di Pisa ha deciso nel 2019 di acquistare e installare una serie di unità modulari pre-assemblate (6 aule) in attesa del finanziamento per mettere in atto una soluzione di lungo periodo. L'edificio scolastico è stato realizzato da Modulcasa Line, un produttore di unità edilizie modulari con sede a Parma (Italia); l'installazione di 29 moduli pre-assemblati nel cortile del Liceo Marconi ha permesso di sviluppare la realizzazione in soli 60 giorni, in modo che le nuove aule fossero disponibili in tempi utili ad accogliere gli studenti per l'inizio delle lezioni.

CS.01 Ampliamento del Villaggio Scolastico di Pontedera (PI)

Concept architettonico-spaziale	Le unità modulari sono aggregate secondo uno schema a blocco con distribuzione lineare interna a corridoio centrale. L'utilizzo di unità volumetriche si rivela un limite nei confronti dell'aggregabilità spaziale, poichè le dimensioni e le configurazioni morfologiche dei moduli costituiscono un vincolo alla flessibilità spaziale e distributiva del progetto.
Tecnologia costruttiva	L'edificio adotta un sistema a unità modulari (<i>portables</i>) realizzate con struttura in acciaio e pannelli di chiusura in acciaio coibentati in schiuma di PIR espanso (pannelli tipo <i>sandwich</i>). L'utilizzo di connessioni a secco, unito alla leggerezza e semplicità di assemblaggio dei componenti, rendono il sistema di rapida installazione, anche da parte di manodopera non specializzata. Tuttavia, il sistema di chiusura offre limitate prestazioni in termini di comfort termo-igrometrico ed acustico, con frequente verificarsi di surriscaldamento, elevate dispersioni termiche e discomfort acustico.
Sistema di attacco a terra	Le unità modulari sono installate su un sistema di fondazione continuo a platea in calcestruzzo armato, una soluzione che limita, una volta cessato l'uso dell'edificio, le possibilità di rendere l'intervento reversibile e ripristinare il sito nelle condizioni originarie.
Strategia di produzione industrializzata	La produzione delle unità modulari è orientata alla standardizzazione e produzione di massa, e risulta prevalentemente orientata a mercati quali quelli della cantieristica, allestimenti per fiere ed eventi. Le unità scolastiche vengono pre-assemblate a partire da uno <i>stock</i> continuo di componenti costruttivi, che presentano limitate opzioni per la personalizzazione dimensionale, morfologica e materica dei moduli.
Strategie per la sostenibilità ambientale	L'edificio integra un sistema fotovoltaico per lo sfruttamento delle energie rinnovabili.



Fig.44 - Fasi di installazione dei moduli prefabbricati (Credits: © Katia Bernardeschi da Il Tirreno: www.iltirreno.gelocal.it)

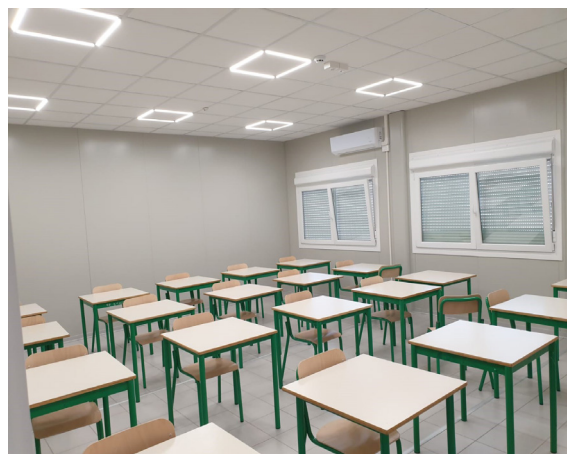


Fig.45 - Vista interna dei nuovi spazi scolastici (Credits: Modulcasaline: www.modulcasaline.com)

Bibliografia e sitografia

Anderson Anderson Architecture

<https://andersonanderson.com/>

Dettagli del progetto

https://www.youtube.com/watch?v=EEt_cZNkR4

Monitoraggio real-time dell'unità scolastica

<http://login.connectwithwow.net/Powersmiths.wow/KioskPage.aspx?request=HuquS0jH3h/EH0G-gw32fuFBP-GtISoH00S1fRfT/TBdchJMj+nOdJ978xjR8ci3NxKaJfKgibnYZDGuDeQWz/xIdGvi1hny9U8pDU-qWE82idBmMxS5t/PsukJRNuW1dir+rM59aIL7E=>

CS.02 Scuola Secondaria di Secondo Grado "Paladini e Civitali"



Fig.46 - Vista esterna dell'ampliamento della Scuola Secondaria "Paladini e Civitali" realizzato attraverso l'installazione di unità modulari in un'area di parcheggio in prossimità della scuola esistente (Credits: Provincia di Lucca, 2018 da www.gonews.it)

Dati

Progettista/azienda	Algeco S.p.a.
Luogo	Lucca, Italia
Anno	2018
Tipo di intervento	Ampliamento di breve periodo
Tempi di realizzazione	2500 000 € (affitto triennale dei moduli)
Costo dell'intervento	20 giorni

Descrizione

Nel 2018 la Provincia di Lucca ha avviato una campagna di verifica della vulnerabilità sismica per l'edificio che ospita il Liceo Classico "Paladini e Civitali" (Complesso di San Nicolao). I risultati delle indagini hanno evidenziato una condizione di forte vulnerabilità dell'edificio, costringendo il Sindaco a sospendere le attività didattiche e a ricercare spazi alternativi per ospitare studenti e docenti. Una parte delle classi è stata trasferita presso un altro edificio scolastico (ITC "Carrara"), presso il quale sono stati reperiti degli spazi per garantire il proseguo delle attività. Le classi per le quali non è stato possibile rintracciare soluzioni alternative sono state invece trasferite all'interno di un ampliamento realizzato in un lotto libero, destinato a parcheggio, nei pressi dell'edificio esistente. Al fine di garantire rapidità ed economicità di realizzazione, la Provincia ha optato per una soluzione costruttiva modulare, noleggiando una serie di unità pre-assemblate dall'azienda Algeco S.p.a. Nonostante inizialmente l'utilizzo delle unità fosse stato previsto per tre anni, fino a giugno 2020, attualmente l'edificio risulta ancora utilizzato, in attesa del completamento degli interventi di riqualificazione del complesso storico di San Nicolao.

CS.02 Scuola Secondaria di Secondo Grado "Paladini e Civitali"

Concept architettonico-spaziale	Le unità modulari sono aggregate secondo uno schema a corte aperta con la distribuzione delle aule che avviene dal percorso interno. L'utilizzo di unità volumetriche rappresenta un limite alla flessibilità spaziale e distributiva del progetto, poiché le configurazioni sono vincolate dalle specifiche caratteristiche dimensionali e morfologiche delle unità modulari.
Tecnologia costruttiva	L'edificio adotta un sistema a unità modulari (<i>portables</i>) realizzate con struttura in acciaio e pannelli di chiusura in acciaio coibentati con lana minerale (pannelli tipo <i>sandwich</i>). L'utilizzo di connessioni a secco, unite alla leggerezza e semplicità di assemblaggio dei componenti, rendono il sistema di rapida installazione, anche da parte di manodopera non specializzata. Tuttavia, il sistema di chiusura offre limitate prestazioni in termini di comfort termo-igrometrico ed acustico, con frequente verificarsi di surriscaldamento, elevate dispersioni termiche e discomfort acustico.
Sistema di attacco a terra	Le unità sono state installate su supporti a secco su un'area già precedentemente infrastrutturata. Tale soluzione rende possibile la completa dismissione dell'intervento una volta cessata la necessità di utilizzo dell'ampliamento, in modo da poter restituire il sito alla collettività per gli usi originariamente previsti.
Strategia di produzione industrializzata	La produzione delle unità modulari è orientata alla standardizzazione e produzione di massa, e risulta prevalentemente orientata a mercati quali quelli della cantieristica, allestimenti per fiere ed eventi. Le unità scolastiche vengono pre-assemblate a partire da uno <i>stock</i> continuo di componenti costruttivi, che presentano limitate opzioni per la personalizzazione dimensionale, morfologica e materica dei moduli.
Strategie per la sostenibilità ambientale	---



Fig.47 - Fasi di installazione dei moduli prefabbricati in sito (Credits: Provincia di Lucca, 2018 da www.provincia.lucca.it)



Fig.48 - Vista interna delle nuove aule prefabbricate (Credits: Provincia di Lucca, 2018 da www.provincia.lucca.it)

Bibliografia e sitografia

Algeco S.p.a.: <https://www.algeco.it/>

Documentazione della gara di appalto: <https://www.provincia.lucca.it/civitali-paladini>

Notizie su quotidiani locali:

<https://www.lanazione.it/lucca/cronaca/lezioni-a-regime-al-paladini-solo-a-partire-dal-primo-ottobre-1.4170138>

<https://www.luccaindiretta.it/dalla-citta/2018/09/07/civitali-arrivati-i-moduli-prefabbricati/126597/>

CS.03 Lavington ECO Classroom



Fig.49 - Vista esterna della Lavington ECO Classroom, installata nel cortile della scuola esistente
(Credits: © Modulek LTD da www.modulek.co.uk/smart-modular-school-buildings/)

Dati

Progettista/azienda	Modulek
Luogo	Market Lavington, UK
Anno	2016
Tipo di intervento	Ampliamento di lungo periodo
Tempi di realizzazione	145 000 €
Costo dell'intervento	150 giorni

Descrizione

La Lavington School comprende diversi livelli di curriculum scolastico, dalla scuola elementare alla scuola media, per i quali era necessario provvedere ad uno spazio aggiuntivo in cui ospitare le attività didattiche, e in particolare le esperienze educative svolte all'aperto. Le esigenze di realizzazione del nuovo spazio, da collocare all'interno del lotto della scuola esistente, sono state improntate alla rapidità di costruzione e alla riduzione dei disservizi per le attività scolastiche. Per questi motivi si è optato per l'installazione di una nuova aula modulare, realizzata da Modulek attraverso l'assemblaggio di tre unità prefabbricate del modello Eco Classroom prodotto dall'azienda inglese. L'intervento ha previsto l'integrazione di una serie di strategie progettuali che garantiscono l'autosufficienza energetica dell'edificio, in particolare elevate prestazioni delle componenti di involucro per ridurre le dispersioni termiche. Il fabbisogno energetico dell'aula è coperto dal Sistema di fotovoltaico integrato in copertura, collegato a una pompa di calore ad aria per il riscaldamento. Al fine di ridurre l'impatto dell'intero ciclo di vita dell'edificio, sono stati selezionati materiali di provenienza locale e basati su risorse naturali ed eco-compatibili.

CS.03 Lavington ECO Classroom

Concept architettonico-spaziale	Le unità modulari sono aggregate in due spazi a blocco con accessi indipendenti dall'esterno. L'utilizzo di unità modulari limita le opzioni di configurabilità spaziale-architettonica, che devono rispettare i limiti dimensionali e morfologici imposti dall'uso di elementi ripetuti a blocco.
Tecnologia costruttiva	L'intervento è realizzato impiegando un sistema a unità modulari con struttura portante a telaio in acciaio e sistema di chiusura a telaio leggero in legno.
Sistema di attacco a terra	Le unità modulari sono installate su un sistema di fondazione continuo a platea in calcestruzzo armato, una soluzione resa necessaria in considerazione dell'uso prolungato dell'aula e della mancanza di opere di infrastrutturazione del sito. Tale scelta tuttavia compromette le future possibilità di dismissione completa dell'intervento, ovvero di renderlo reversibile e ripristinare il sito nelle condizioni originarie.
Strategia di produzione industrializzata	La produzione dei modelli di ECO Classroom è improntata a principi di customizzazione di massa; a partire da un kit di elementi standardizzati è infatti possibile personalizzare il progetto delle unità secondo una serie di opzioni dimensionali, di materiali, di configurazione spaziale e soluzioni architettonico-compositive.
Strategie per la sostenibilità ambientale	Il progetto integra strategie progettuali passive per ridurre il fabbisogno energetico dell'edificio, in particolare elevate prestazioni di involucro opaco e trasparente, per minimizzare le dispersioni energetiche, e ottimizzazione del controllo della radiazione solare. Nella copertura è previsto un sistema fotovoltaico che copre il fabbisogno energetico dell'aula, collegato ad una pompa di calore per il riscaldamento invernale. La scelta dei materiali è orientata all'uso di risorse locali, a ridotto impatto sull'ambiente ed eco-compatibili.



Fig.50 - Vista esterna della ECO Classroom presso la Lavington School di Market Lavington (UK) (Credits: © Modulek LTD da Flickr)



Fig.51 - Vista interna di una delle nuove aule realizzate con il modello di unità ECO Classroom (Credits: © Modulek LTD da Flickr)

Bibliografia e sitografia

Modulek: <https://www.modulek.co.uk/>

Dettagli del progetto: <https://www.modulek.co.uk/case-studies-2/lavington-school-2/>

CS.04 Sawley Junior School



Fig.52 - Vista esterna dell'ampliamento della Sawley Juonior School (Credits: © 2022 Garden Offices da www.greengardenoffices.com/case-studies/full-sized-modular-classrooms-sawley-junior-school-long-eaton)

Dati

Progettista/azienda	Green Modular
Luogo	Long Eaton, UK
Anno	2016
Tipo di intervento	Ampliamento di lungo periodo
Tempi di realizzazione	189 000 €
Costo dell'intervento	45 giorni

Descrizione

La Sawley Junior School ha manifestato una serie di problematiche connesse con un aumento progressivo del numero di iscrizioni annuali, che hanno comportato una mancanza di spazi per assecondare le esigenze della programmazione didattica. L'amministrazione della scuola ha dunque deciso di avviare un progetto di ampliamento degli spazi esistenti, costruendo due aule aggiuntive nel cortile dell'edificio attuale. Per mediare tale necessità con l'esigenza di disporre velocemente dei nuovi spazi, e di evitare interferenze tra il cantiere e le attività scolastiche, la strategia progettuale si è orientata verso l'installazione di unità modulari, commissionata all'azienda inglese Green Modular. Le unità sono state realizzate per assicurare la reversibilità dell'intervento, in particolare prediligendo un sistema di attacco a terra su supporti prefabbricati e disassemblabili. Tale scelta si è rivelata anche funzionale a minimizzare l'impatto sulle strutture storiche esistenti, consentendo di svincolare l'intervento dalla necessità di specifiche approvazioni da parte della Sovrintendenza. Il processo di progettazione e produzione di Green Modular si basa su un principio di sostenibilità declinato alle diverse scale di approfondimento, dalla scelta di materiali eco-compatibili alla realizzazione di edifici a ridotto fabbisogno energetico ed elevata qualità costruttiva e di comfort per l'utenza.

CS.04 Sawley Junior School

Concept architettonico-spaziale	Le unità modulari sono aggregate secondo uno schema a blocco per formare due aule accessibili da uno spazio di distribuzione centrale, che rappresenta un luogo di aggregazione e per lo svolgimento di attività di apprendimento a carattere informale. In questo caso dunque, pur utilizzando unità volumetriche, il progetto ha implementato una configurazione spaziale più articolata, che accoglie istanze pedagogiche diversificate.
Tecnologia costruttiva	Il nuovo corpo di fabbrica è realizzato con unità volumetriche modulari con struttura in pannelli SIP (Structural Insulated Panels), ovvero pannelli prefabbricati con struttura interna in schiuma rigida (PIR o PU espanso) confinata da pannelli esterni OSB (Oriented Strand Board).
Sistema di attacco a terra	Le unità sono state installate su un sistema di fondazione a viti in acciaio prefabbricate che, una volta cessato l'uso delle aule, potranno essere disinstallati per ripristinare e rinaturalizzare il cortile della scuola esistente.
Strategia di produzione industrializzata	La produzione industrializzata delle unità modulari è improntata ad un approccio di customizzazione di massa; a partire elementi standardizzati (pannelli SIP) è infatti possibile personalizzare il progetto delle unità secondo una serie di opzioni dimensionali, di materiali, di configurazione spaziale e soluzioni architettonico-compositive.
Strategie per la sostenibilità ambientale	Il progetto si propone di implementare un modello di spazio scolastico con ridotto impatto del ciclo di vita. Tale intento è perseguito selezionando materiali con limitato carico ambientale e circolari, provenienti da fonti di riciclo e riciclabili al termine dell'uso dell'unità. La reversibilità dell'intervento è resa possibile anche attraverso la specifica soluzione tecnologica utilizzata per la connessione al suolo, poiché i supporti possono essere disinstallati per rinaturalizzare il sito.



Fig.53 - Vista delle due nuove aule dal cortile della scuola esistente (Credits: © 2022 Garden Offices da www.greengardenoffices.com/case-studies/full-sized-modular-classrooms-sawley-junior-school-long-eaton)



Fig.54 - Le unità modulari sono installate su un sistema di fondazione a viti in acciaio prefabbricato e reversibile, che consentirà in futuro di rinaturalizzare il sito (Credits: Green Modular da www.green-modular.com)

Bibliografia e sitografia

Green Modular: <https://www.green-modular.com/>
(expired link, trasferito su Green Garden Offices: <https://www.greengardenoffices.com/>)

CS.05 Waldorf Elementary School



Fig.55 - Il modello di SAGE Classroom installata presso la Waldorf Elementary School (Credits: © SAGE 2020 da www.sageclassroom.com)

Dati

Progettista/azienda	SAGE
Luogo	Corvallis (OR), USA
Anno	2014
Tipo di intervento	Ampliamento di lungo periodo
Tempi di realizzazione	---
Costo dell'intervento	4 giorni (installazione in sito)

Descrizione

La Scuola Primaria Waldorf ha affrontato una problematica comune per molte scuole negli Stati Uniti, ovvero la necessità di ampliare rapidamente i propri spazi per far fronte alla sempre più acuta pressione del sovraffollamento delle aule. L'amministrazione della scuola ha inteso fronteggiare tale emergenza ricorrendo all'acquisto e installazione di una SAGE (Smart Academic Green Environment) Classroom, ovvero un modello di aula prefabbricata sostenibile e a ridotto impatto ambientale, alternativa rispetto alle tradizionali soluzioni di *portable classrooms*. Il progetto SAGE è stato avviato dagli studenti della Scuola di Architettura e Ingegneria della Portland State University (PSU), e finora ha visto la realizzazione di circa 100 aule emergenziali realizzate tra gli USA e il Canada. Il progetto dell'aula è stato sviluppato in sinergia con il PSU's Green Building Research Lab e l'Institute for Sustainable Solutions, in accordo a principi di sostenibilità ambientale, efficienza energetica e uso razionale delle risorse, innovazione spaziale e comfort per l'utenza, riduzione dei costi di uso e gestione degli spazi. In questo senso, la sostenibilità dell'intervento è interpretata come un mezzo propedeutico ad auto-sostenere, da parte delle amministrazioni scolastiche, il costo di acquisto delle unità SAGE, ammortizzandolo attraverso il contenimento della spesa energetica nelle fasi di gestione.

CS.05 Waldorf Elementary School

Concept architettonico-spaziale	Le unità modulari sono aggregate in tre spazi indipendenti, studiati e dimensionati in modo da poter essere flessibili e riconfigurabili a seconda delle esigenze e metodologie didattiche.
Tecnologia costruttiva	Le aule sono realizzate con un sistema a unità volumetriche con struttura a telaio in acciaio, tamponato da sistemi di pannellature leggere.
Sistema di attacco a terra	Le unità sono state installate su un sistema di Fondazione prefabbricato e reversibile, in modo da assicurare la dismissibilità dell'intervento e la riduzione dell'impatto sul sito di intervento.
Strategia di produzione industrializzata	---
Strategie per la sostenibilità ambientale	Il concept progettuale della SAGE Classroom prevede l'integrazione di una serie di strategie – attive e passive – per garantire la sostenibilità ambientale ed efficienza energetica dell'intervento, nonché il comfort indoor degli spazi educativi. Particolare attenzione è stata posta allo studio dell'illuminazione naturale e all'ottimizzazione della radiazione solare incidente, oltre che alla selezione di materiali ad elevata eco-compatibilità per le finiture interne ed esterne. Per quanto riguarda lo sfruttamento delle risorse energetiche, è prevista l'integrazione di un sistema fotovoltaico in copertura. È stato inoltre predisposto un sistema per l'accumulo e il riutilizzo delle acque meteoriche.



Fig.56 - Schema concettuale dell'unità scolastica SAGE, in cui vengono messe in evidenza le principali strategie di sostenibilità e qualità ambientale adottate (Credits: © SAGE 2020 da www.sageclassroom.com)



Fig.57 - Vista interna della SAGE Classroom installata presso la Waldorf Elementary School (Credits: © SAGE 2020 da www.sageclassroom.com)

Bibliografia e sitografia

SAGE: <https://www.sageclassroom.com/>

Dettagli del progetto:

<http://www.centerforpublicinterestdesign.org/sage-classroom>

https://pacificmobile.com/system_files/product/project_profile/70.pdf

CS.06 Energy-Positive Relocatable Classroom



Fig.58 - Il primo prototipo di Energy-Positive Relocatable Classroom installato presso Ewa Beach (HI, USA)
(Credits: © Anderson Anderson Architecture da www.architizer.com)

Dati

Progettista/azienda	Anderson Anderson Architecture
Luogo	Ewa Beach (HI), USA
Anno	2014
Tipo di intervento	Prototipo
Tempi di realizzazione	440 000 €
Costo dell'intervento	---

Descrizione

Nelle isole Hawaii si stima che uno studente su quattro frequenti la scuola in *portable classrooms* caratterizzate da minimi standard qualitativi e di comfort. Per far fronte a questa situazione, il Department of Education ha commissionato la progettazione di un modello di unità scolastica emergenziale altamente tecnologica, efficiente e sostenibile. Il prototipo della Energy Positive Relocatable Classroom è stato inteso come un caso-studio per testare una più ampia diffusione del modello in tutto lo Stato delle Hawaii, andando a sostituire le circa 10.000 unità attualmente in uso presso i distretti scolastici. Per questo motivo, particolare attenzione è stata posta alla progettazione di un sistema tecnologico flessibile, adattabile e declinabile alle esigenze del contesto. La progettazione è stata oggetto di uno studio approfondito sulle performance energetico-ambientali del modulo scolastico e di un successivo monitoraggio triennale per verificare il costo del ciclo di vita dell'unità in ottica LCC. Il modulo scolastico è stato pre-assemblato presso la fabbrica di Blazer Industries in Oregon, quindi trasportato e installato ad Ewa Beach. I dati acquisiti in fase di uso sono stati resi disponibili *real-time* in una piattaforma web, in modo da poter essere condivisi con la comunità ed essere utilizzati come vero e proprio strumento didattico per educare gli studenti ad un uso consapevole delle risorse.

CS.06 Energy-Positive Relocatable Classroom

Concept architettonico-spaziale	Le unità modulari sono aggregate in uno spazio unico a blocco. L'utilizzo di unità volumetriche di dimensioni standard limita la configurabilità spaziale dell'edificio, in quanto l'edificio risulta dalla ripetizione di moduli morfologicamente standardizzati.
Tecnologia costruttiva	L'edificio è realizzato con un sistema volumetrico composto da una struttura a telaio in acciaio tamponata con pannelli a telaio leggero in legno (<i>platform frame</i>).
Sistema di attacco a terra	Le unità modulari sono installate su un sistema di fondazione puntuale, realizzato con elementi prefabbricati e disinstallabili al termine dell'uso, garantendo la completa reversibilità dell'intervento e il ripristino del suolo.
Strategia di produzione industrializzata	Il modello della Energy-Positive Relocatable Classroom è stato realizzato in un'ottica di soluzione prototipale, e non sono state approfonditi gli aspetti legati ad una successiva fase di produzione industrializzata su larga scala.
Strategie per la sostenibilità ambientale	Il progetto integra una serie di strategie passive e attive per garantire la sostenibilità ambientale, l'efficienza energetica e il comfort per l'utenza. In particolare, sono stati studiati e verificati gli aspetti relativi all'illuminazione naturale e all'ottimizzazione degli apporti energetici gratuiti derivanti dalla radiazione solare. Per quanto riguarda i sistemi attivi, la copertura integra pannelli fotovoltaici che producono energia sufficiente a soddisfare il fabbisogno dell'aula. Al di sotto del solaio di calpestio sono state inoltre integrate delle taniche per l'accumulo e lo stoccaggio dell'acqua piovana, che viene riutilizzata per gli usi non potabili.



Fig.59 - Le unità prefabbricate della Energy-Positive Relocatable Classroom vengono pre-assemblate e finite all'interno della fabbrica (Credits: © Anderson Anderson Architecture da www.architizer.com)



Fig.60 - Fasi di installazione in sito della Energy-Positive Relocatable Classroom (Credits: © Anderson Anderson Architecture da www.architizer.com)

Bibliografia e sitografia

Anderson Anderson Architecture: <https://andersonanderson.com/>

Dettagli del progetto: https://www.youtube.com/watch?v=EEt_cZNkR4

Monitoraggio real-time dell'unità scolastica:

<http://login.connectwithwow.net/Powersmiths.wow/KioskPage.aspx?request=HuquS0jH3h/EH0G-gw32fuFBP-GtIsoH00S1frfT/TBdcHJMj+nOdJ978xjR8ci3NxKaJfKgibnYZDGuDeQWz/xIdGvi1hny9U8pDU-qWE82idBmMxs5t/PsukJRNUw1dir+rM59aIL7E=>

CS.07 Perkins SEED Classroom



Fig.61 - Il primo prototipo di SEED Classroom installato a Seattle (WA) (Credits: SEED Collaborative da <https://inhabitat.com/modular-net-zero-net-energy-seed-classroom-to-debut-in-pittsburg/seed-classroom-seed-collaborative-3/>)

Dati

Progettista/azienda	Method Homes
Luogo	Seattle (WA), USA
Anno	2014
Tipo di intervento	Prototipo
Tempi di realizzazione	180 000 €
Costo dell'intervento	---

Descrizione

SEED (Sustainable Energy Every Day) Classroom è un prototipo di unità scolastica modulare *net-Positive Energy* e *net-Zero Water*. Il prototipo è stato sviluppato per testare un modello innovativo di aula scolastica emergenziale, alternativa rispetto alle *portable classrooms* attualmente utilizzate negli USA. In prospettiva, l'intento del progetto è stato quello di catalizzare gli investimenti verso soluzioni educative all'avanguardia, allineate ai più recenti indirizzi per la progettazione degli spazi di apprendimento e per la sostenibilità degli edifici pubblici. L'unità scolastica è stata progettata in accordo ai 20 Imperatives della Living Building Challenge, un protocollo di certificazione internazionale che richiede di adottare soluzioni innovative per l'efficienza energetica, l'uso sostenibile delle risorse naturali e l'impiego di materiali eco-compatibili e a ridotto carico ambientale. Il primo prototipo è stato esposto durante la Living Future Un Conference; i moduli che lo componevano non sono stati resi completamente solidali e, al termine della mostra, le unità volumetriche sono state disinstallate e stoccate per un anno presso il magazzino del produttore. Un anno dopo, la Perkins School ha acquistato le unità per installarle come ampliamento di lungo termine in prossimità degli edifici esistenti. Un modello analogo è stato successivamente installato nel 2015 presso il Phipp's Conservatory a Pittsburgh.

CS.07 Perkins SEED Classroom

Concept architettonico-spaziale	Le unità modulari sono aggregate in uno spazio unico, pensato per essere riprogrammabile a seconda delle esigenze della didattica. Di interesse è la soluzione utilizzata per l'integrazione dei servizi, che sono stati accentrati in una specifica unità (<i>service pod</i>) per facilitare l'assemblaggio e la connessione dei sistemi con gli impianti di rete.
Tecnologia costruttiva	Il prototipo è realizzato con unità volumetriche modulari con struttura in pannelli SIP (Structural Insulated Panels), ovvero pannelli prefabbricati con struttura interna in schiuma rigida (PIR o PU espanso) confinata da pannelli esterni OSB (Oriented Strand Board).
Sistema di attacco a terra	Le unità modulari sono state installate su supporti prefabbricati a loro volta appoggiati al suolo; tale soluzione è stata resa possibile dalla presenza di un lotto già precedentemente infrastrutturato, che è stato poi ripristinato una volta dismessa l'unità.
Strategia di produzione industrializzata	Il progetto SEED è stato implementato fino ad uno stadio prototipale, motivo per cui non è stata prevista una specifica strategia per la sua produzione industriale su vasta scala.
Strategie per la sostenibilità ambientale	Il progetto è stato sviluppato integrando i principi della Living Building Challenge, un protocollo di certificazione della sostenibilità degli edifici. Le strategie adottate includono in particolare: elevate prestazioni dei componenti di involucro, opachi e trasparenti; uso di materiali eco-compatibili e a ridotto impatto ambientale del ciclo di vita, riciclati e riciclabili; integrazione di un sistema fotovoltaico in copertura per rendere l'unità energeticamente indipendente; monitoraggio dei consumi energetici e automazione del controllo ambientale; raccolta e riutilizzo delle acque meteoriche.



Fig.62 - Le unità modulari sono completate off-site fino ad un grado di pre-assemblaggio del 90%, riducendo le operazioni in sito alla sola connessione e sigillatura dei giunti tra i moduli (Credits: SEED Collaborative da <https://inhabitat.com/modular-net-zero-net-energy-seed-classroom-to-debut-in-pittsburg/seed-classroom-seed-collaborative-3/>)



Fig.63 - Vista interna della SEED Classroom (Credits: SEED Collaborative da <https://inhabitat.com/modular-net-zero-net-energy-seed-classroom-to-debut-in-pittsburg/seed-classroom-seed-collaborative-3/>)

Bibliografia e sitografia

Living Building Challenge, SEED Classroom:

<https://living-future.org/lbc/case-studies/perkins-seed-classroom/>

Method Homes: <https://methodhomes.net/project/seed-classroom/>

Dettagli del progetto: <https://www.solaripedia.com/files/1309.pdf>

CS.08 Sprout Space™



Fig.64 - Il prototipo Sprout Space installato nel cortile del National Building Museum a Washington D.C. (USA)
(Credits: © 2022 Perkins+Will da www.sproutspace.com)

Dati

Progettista/azienda	Perkins & Will
Luogo	Washington D.C., USA
Anno	2013
Tipo di intervento	Prototipo e ampliamento di breve periodo
Tempi di realizzazione	130 000 €
Costo dell'intervento	60 giorni

Descrizione

Sprout Space™ è un prototipo di aula modulare flessibile e sostenibile, improntato a principi di rapida installazione, dismissibilità e ricollocabilità. È stato progettato per avere un ciclo di vita utile fino a 20 anni, al termine dei quali i componenti costruttivi possono essere disassemblati e i materiali avviati a riciclo/riuso. L'unità è stata implementata nell'ambito di un concorso bandito da Architect for Humanity in collaborazione con Open Architecture Network, ed è stato installato in mostra presso il National Building Museum in Washington D.C. Lo studio Perkins&Will ha sviluppato il progetto in stretta collaborazione con l'azienda di prefabbricazione modulare Triumph Modular, con l'obiettivo di definire un concept innovativo ed altamente efficiente di aula modulare, scalabile e adattabile a diversi contesti di utilizzo. Il prototipo è infatti conforme ai più stringenti standard di qualità ambientale interna ed è stato progettato per soddisfare le specifiche del protocollo di certificazione LEED. I principi progettuali includono anche una serie di strategie per promuovere un uso razionale delle risorse naturali, tra cui l'integrazione di un sistema fotovoltaico per rendere l'unità energeticamente indipendente, elevate prestazioni di involucro per ridurre le dispersioni e la raccolta e riuso delle acque meteoriche.

CS.08 Sprout Space™

Concept architettonico-spaziale	Lo spazio scolastico è formato dall'aggregazione di due unità modulari sfalsate tra di loro; al fine di razionalizzare le componenti di impianto e velocizzare le operazioni di messa in opera e connessione alla rete, i servizi sono concentrati in una specifica unità volumetrica (<i>service pod</i>). Il concept di progetto include anche una serie di schemi aggregativi-tipo in cui più aule sono connesse da rampe orizzontali, in modo da assecondare le esigenze di infrastrutturazione di edifici scolastici più complessi.
Tecnologia costruttiva	L'aula è realizzata con un sistema a unità modulari realizzate con una struttura a telaio in legno e pannelli a frame leggero di chiusura.
Sistema di attacco a terra	---
Strategia di produzione industrializzata	Il progetto ha previsto la sola realizzazione di un primo prototipo e, dopo un anno dall'installazione presso il National Building Museum l'azienda Triumph Modular ha deciso di ritirarlo dal mercato.
Strategie per la sostenibilità ambientale	Sprout Space™ è stato progettato per rispettare gli standard del protocollo di certificazione LEED, e integra una serie di strategie progettuali-tecnologiche per arrivare al net-Zero Energy. Particolare attenzione è stata posta all'ottimizzazione della radiazione solare, all'illuminazione e alla ventilazione naturale. Il tetto a doppia falda serve a convogliare le acque meteoriche, che vengono raccolte e riutilizzate sul posto, nonché ad integrare un sistema fotovoltaico sufficiente a coprire il fabbisogno energetico dell'aula.



Fig.65 - Il progetto Sprout Space è stato concepito anche come occasione di apprendimento per gli studenti; il sistema di rivestimento esterno è stato infatti utilizzato come supporto per svolgere lezioni all'aperto, durante le quali spiegare agli alunni il funzionamento dell'unità scolastica (Credits: © 2022 Perkins+Will da <https://inhabitat.com/innovative-sprout-space-prefab-classroom-on-its-way-to-the-national-building-museum/>)

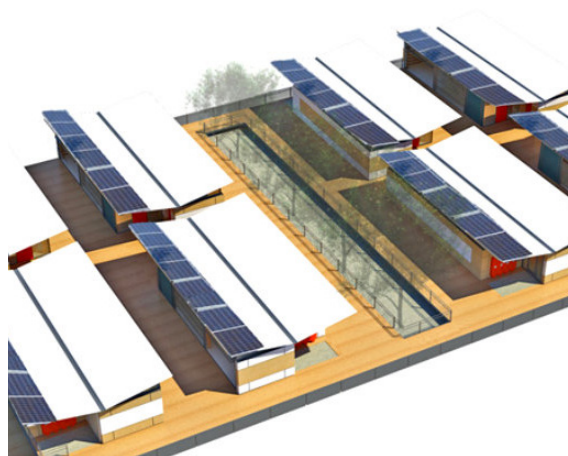


Fig.66 - Il progetto è stato accompagnato dalla previsione di una serie di schemi aggregativi per la replicabilità del modello Sprout Space su vasta scala (Credits: © Sam Kittner da <https://www.dwell.com/article/sprout-space-green-classroom-2de-a8bd4/6133459508510199808>)

Bibliografia e sitografia

Sprout Space™: <http://www.sproutspace.com/>

Perkins & Will: <https://perkinswill.com/>

Triumph Modular: <https://www.triumphmodular.com/>

Dettagli del progetto:

<https://www.triumphmodular.com/sproutspace/sustainable-features/>

<http://www.sproutspace.com/News/Index>

CS.09 Scuola Secondaria di Secondo Grado "M. Malpighi"



Fig.67 - Vista esterna della scuola "M. Malpighi" realizzata a seguito del terremoto in Emilia Romagna del 2012
(Credits: Courtesy © Fae Terni S.p.a)

Dati

Progettista/azienda	Fae Terni S.p.a.
Luogo	Crevalcore (BO), Italy
Anno	2012
Tipo di intervento	Soluzione post-terremoto di breve periodo
Tempi di realizzazione	---
Costo dell'intervento	---

Descrizione

Il 20 maggio 2012, un terremoto di magnitudo 6.1 ha colpito l'Emilia Romagna, causando vittime e danni severi a gran parte degli edifici. Tra questi, anche molte scuole, soprattutto nei centri storici, hanno subito profondi danneggiamenti, e circa 8500 studenti sono rimasti privi di spazi in cui svolgere le lezioni. Tra le scuole colpite, 39 sono state valutate come riparabili sul medio periodo, ovvero entro 9-12 mesi dal terremoto. Per accogliere gli studenti, la Regione ha previsto la realizzazione di strutture provvisorie che potessero ospitare le attività didattiche in attesa della messa in sicurezza e riparazione dei danni sulle scuole esistenti. La Scuola Secondaria "M. Malpighi" rappresenta un esempio di infrastruttura scolastica di emergenza realizzata a questo scopo. Con l'obiettivo di fornire una soluzione in breve tempo e ottimizzare le risorse economiche a disposizione della gestione post-disastro, la scelta si è orientata sull'acquisto e installazione di unità modulari containerizzate, pre-assemblate in officina e trasportate in sito per essere aggregate e installate in breve tempo e con l'ausilio di un numero ridotto di operai non specializzati.

CS.09 Scuola Secondaria di Secondo Grado "M. Malpighi"	
Concept architettonico-spaziale	Le unità modulari sono state aggregate in due blocchi lineari paralleli, in cui la distribuzione alle aule avviene da uno spazio a corridoio centrale. L'utilizzo di unità volumetriche limita le possibilità di aggregazione in schemi complessi e articolati, poiché le configurazioni spaziali derivano dalla ripetizione lineare di un modulo dimensionalmente e morfologicamente standardizzato.
Tecnologia costruttiva	L'edificio adotta un sistema a unità modulari <i>containerizzate</i> realizzate con struttura in acciaio e pannelli di chiusura in acciaio coibentati in schiuma di materiale polimerico (pannelli tipo <i>sandwich</i>). L'utilizzo di connessioni a secco, unito alla leggerezza e semplicità di assemblaggio dei componenti, rendono il sistema di rapida installazione, anche da parte di manodopera non specializzata. Tuttavia, il sistema di chiusura offre limitate prestazioni termo-igrometriche ed acustiche, al di sotto degli standard prescritti dalla normativa di settore, con frequente verificarsi di surriscaldamento, elevate dispersioni termiche e discomfort acustico.
Sistema di attacco a terra	Le unità modulari sono state installate su un sistema di fondazione continuo a platea in calcestruzzo armato. Come conseguenza, una volta dismesse le unità (2016), il sito su cui erano state installate, inizialmente terreno agricolo, è stato convertito stabilmente a spazio di parcheggio, poiché l'area su cui erano installate le unità modulari era stata infrastrutturata (impermeabilizzandola) in maniera "irreversibile".
Strategia di produzione industrializzata	La produzione delle unità modulari è orientata alla standardizzazione e produzione di massa, poiché prevalentemente destinata a settori di impiego quali quelli della cantieristica, allestimenti per fiere ed eventi. Le unità scolastiche vengono pre-assemblate a partire da uno stock continuo di componenti costruttivi, che presentano limitate opzioni per la personalizzazione dimensionale, morfologica e materica dei moduli, nonché per l'adattabilità secondo il contesto di impiego (prestazioni dei componenti di involucro, integrazione di schermature, inclinazione della copertura, ecc.).
Strategie per la sostenibilità ambientale	---



Fig.68 - Le unità modulari sono state pre-assemblate in officina e trasportate in sito per l'installazione e il completamento in opera degli infissi e finiture (Credits: © Fae Terni S.p.a da www.faeterni.it)



Fig.69 - Vista interna di un'aula della Scuola Secondaria "M. Malpighi" (Credits: Courtesy © Fae Terni S.p.a)

Bibliografia e sitografia

Fae Terni S.p.a.: <http://www.faeterni.it/>

Dossier sugli interventi di ricostruzione delle scuole post-terremoto in Emilia Romagna: *Arketipo*, n.70/2013

CS.10 Edificio Scolastico Temporaneo (EST) "Mantovani e Gonnelli"



Fig.70 - Vista esterna dell'Edificio Scolastico Temporaneo(EST) realizzato a Mirabello per la gestione del post-sisma del 2012
(Credits: © Mario Cucinella Architects)

Dati

Progettista/azienda	MCA Mario Cucinella Architects
Luogo	Mirabello (FE), Italia
Anno	2012
Tipo di intervento	Soluzione post-terremoto di breve periodo, riconvertibile per usi prolungati
Tempi di realizzazione	1.1 milioni €
Costo dell'intervento	45 giorni

Descrizione

La Scuola "Malpighi e Gonnelli" è uno degli Edifici Scolastici Temporanei (EST) realizzato a seguito del terremoto in Emilia Romagna del 2012, ovvero un edificio che doveva inizialmente ospitare funzioni scolastiche – in attesa della messa in sicurezza delle scuole danneggiate – e che poi è stato riconvertito a funzioni collettive di carattere ludico-ricreativo e culturale. Il progetto dell'edificio si basa su una scansione in tre macro-sezioni tra loro parallele, evidenziate dai setti rossi in calcestruzzo prefabbricati. La scelta della tecnologia costruttiva, seppure non sia di largo uso in Italia, è stata dettata dalle esigenze del programma edilizio, che hanno richiesto di mediare velocità e semplicità di esecuzione con costi di intervento ridotti, elevate prestazioni di involucro per il controllo delle dispersioni e possibilità di futura dismissione dell'edificio. I pannelli in calcestruzzo sono stati prodotti *off-site* e installati in sito in 45 giorni, permettendo cioè di ridurre i tempi di posa del materiale e di portare avanti la lavorazione in officina contemporaneamente alle opere di sistemazione del sito. L'elevata massa del materiale consente di ottenere elevate prestazioni termo-igrometriche degli involucri opachi, con un fabbisogno energetico annuo stimato 7.68 kW/m2a (Classe A).

CS.10 Edificio Scolastico Temporaneo (EST) "Mantovani e Gonnelli"

Concept architettonico-spaziale	L'edificio è concepito come una sequenza di spazi longitudinali la cui scansione è marcata dai setti portanti prefabbricati in calcestruzzo. Al fine di aprire gli spazi e renderli fruibili alla comunità, la distribuzione interna è stata studiata per permettere l'unione di più spazi e la loro facile riprogrammazione. Tale soluzione è resa possibile attraverso l'utilizzo della struttura portante lineare, che consente una maggiore flessibilità nella progettazione spaziale e distributiva rispetto ai sistemi modulari.
Tecnologia costruttiva	La scuola è realizzata con un sistema a struttura portante continua formata da setti prefabbricati in calcestruzzo, sormontati in copertura da un sistema a travi in acciaio chiusi da pannellature leggere in acciaio coibentato. L'elevata massa del calcestruzzo permette di ottenere prestazioni termiche dell'involucro compatibili con gli standard di efficienza energetica stabiliti dalla normativa per l'edilizia pubblica.
Sistema di attacco a terra	I pannelli sono stati installati su fondazioni di tipo continuo in calcestruzzo, necessarie per supportare il peso elevato dei setti portanti.
Strategia di produzione industrializzata	La produzione dei pannelli prefabbricati in calcestruzzo è prevalentemente orientata alla produzione di massa; la produzione di elementi diversi richiede infatti la riprogettazione delle casseforme, che contribuisce ad aumentare sostanzialmente i costi, rendendo più economicamente vantaggiosa la produzione di elementi standardizzati in serie.
Strategie per la sostenibilità ambientale	La scuola è stata progettata per raggiungere lo standard Classe A di efficienza energetica. L'obiettivo è stato raggiunto attraverso la progettazione di un sistema di involucro ad elevata massa e inerzia termica, lo studio e il controllo della radiazione solare in ingresso e l'integrazione di sistemi impiantistici ad elevata efficienza.



Fig.71 - I pannelli in calcestruzzo sono stati pre-assemblati in officina e trasportati in cantiere per l'installazione, dopodiché completati con le opere di finitura (Credits: © Veronica Santadrea per MCA)

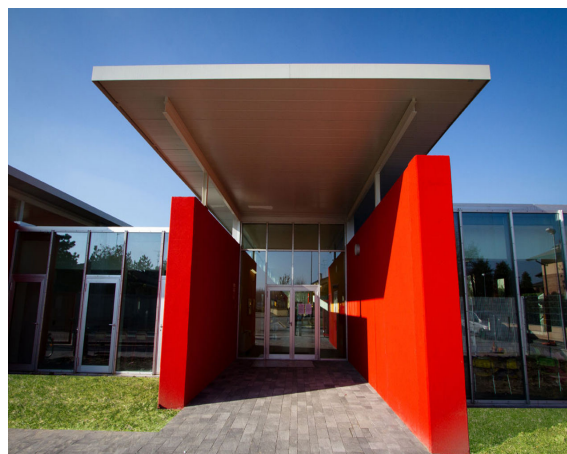


Fig.72 - Il sistema di copertura ha previsto l'adozione di tecnologie assemblate a secco, in modo da ridurre il peso degli elementi, velocizzare le operazioni di installazione e rendere facilmente disassemblabili i componenti al termine del ciclo di vita dell'edificio (Credits: © Mario Cucinella Architects)

Bibliografia e sitografia

Mario Cucinella Architects: <https://www.mcarchitects.it/>

Interventi di ricostruzione di edilizia scolastica post-terremoto in Emilia Romagna:
<https://www.iltimedellascuola.it/>

CS.11 Gen7 Brentwood School



Fig.73 - Il modello di Gen7School installato nel cortile della Brentwood School a Los Angeles (CA, USA)
(Credits: © American Modular System™ da www.americanmodular.com)

Dati

Progettista/azienda	American Modular System™ (AMS) Gen7Schools
Luogo	Los Angeles (CA), USA
Anno	2011
Tipo di intervento	Ampliamento di lungo periodo
Tempi di realizzazione	---
Costo dell'intervento	---

Descrizione

La Gen7 Brentwood School è un ampliamento di lungo periodo realizzato nel cortile dell'omonima scuola del distretto di L.A. (CA) per fronteggiare l'emergenza provocata dall'aumento repentino nel numero di iscrizione e dal conseguente sovraffollamento delle aule. L'intervento è stato realizzato attraverso l'installazione di un modello di Gen7 Schools, unità scolastiche modulari prodotte da AMS™ secondo principi di qualità costruttiva e ambientale, efficienza energetica e sostenibilità, così che lo stesso edificio scolastico diventi strumento didattico per educare gli alunni al rispetto delle risorse naturali. Le Gen7 Schools possono essere configurate dai committenti attraverso il Gen7 Configurator, un applicativo web che consente agli utenti di customizzare, assemblare e verificare le prestazioni del progetto a partire da un catalogo virtuale di elementi standardizzati. L'intervento presso la Brentwood School è certificato LEED Gold e ha prestazioni energetiche conformi agli standard net-Zero Energy, ottenute attraverso elevate prestazioni dei componenti di involucro, installazione di sensori e sistemi domotici per la gestione dei parametri ambientali (illuminazione, ventilazione, riscaldamento e raffrescamento); inoltre, il consumo energetico dell'aula è monitorato e trasmesso online in tempo reale per essere consultabile da parte di studenti, genitori e gestori. Il ridotto fabbisogno energetico è coperto dal sistema fotovoltaico integrato nelle schermature solari.

CS.11 Gen7 Brentwood School

Concept architettonico-spaziale	Le unità modulari sono aggregate in tre spazi a blocco, ciascuno accessibile dall'esterno. L'utilizzo di soluzioni modulari morfologicamente standardizzate limita le possibilità di configurare spazi architettonicamente articolati, seppure i moduli siano customizzabili – attraverso il configuratore – nelle dimensioni e aggregazioni.
Tecnologia costruttiva	L'edificio è realizzato con un sistema a unità modulari con struttura in acciaio e tamponamento in pannelli a <i>frame</i> leggero in acciaio (<i>Light Steel Frame, LSF</i>), che assicurano la riduzione del peso dei moduli in previsione del loro trasporto.
Sistema di attacco a terra	Le unità modulari sono installate su un sistema di fondazione continuo a platea in calcestruzzo armato, una soluzione richiesta in considerazione del ciclo di vita utile della scuola, stimato in circa 50 anni.
Strategia di produzione industrializzata	La produzione delle unità segue un approccio improntato alla customizzazione di massa, ovvero a partire da elementi standardizzati (profili in acciaio), il cliente può personalizzare il prodotto finale a fronte di un minimo costo di riprogrammazione della produzione. Le opzioni rese possibili per la personalizzazione sono quelle dimensionali, di aggregazione dei moduli, di composizione delle soluzioni di involucro e di completamento e finitura interna/esterna.
Strategie per la sostenibilità ambientale	Le Gen7Schools sono progettate in accordo agli standard net-Zero Energy e a quelli del protocollo LEED. Il controllo dei parametri ambientali è affidato ad un Energy Management System collegato ai sistemi impiantistici per il controllo automatizzato dell'illuminazione, ventilazione, riscaldamento e raffrescamento. Le soluzioni di involucro sono progettate per minimizzare le dispersioni termiche e integrano sistemi di schermatura per regolare l'ingresso della radiazione solare nei mesi più caldi.



Fig.74 - I pannelli fotovoltaici sono integrati come schermatura solare al fine di ottimizzare la captazione dell'energia e impedire il surriscaldamento dell'ambiente interno (Credits: © American Modular SystemTM da www.americanmodular.com)

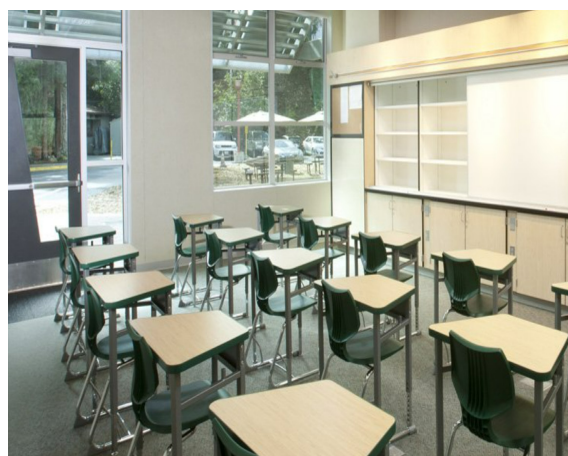


Fig.75 - Vista interna di una delle aule realizzate attraverso il modello di aula prefabbricata Gen7 (Credits: © American Modular SystemTM da www.americanmodular.com)

Bibliografia e sitografia

Gen7 Schools: <https://www.gen7schools.com/>

AMS: <https://www.americanmodular.com/>

CS.12 Bertschi School Living Lab



Fig.76 - Vista esterna dell'ampliamento della Bertschi School, realizzato nel cortile dell'edificio esistente
(Credits: © Benjamin Benschneider da www.living-future.org)

Dati

Progettista/azienda	KMD Architects
Luogo	Seattle (WA), USA
Anno	2011
Tipo di intervento	Ampliamento di lungo periodo
Tempi di realizzazione	814 000 €
Costo dell'intervento	180 giorni

Descrizione

Il progetto rappresenta un ampliamento della Bertschi School, situata nel quartiere di Capitol Hill di Seattle. Lo sviluppo progettuale è stato seguito pro-bono dal team di KMD Architects in stretta collaborazione con utenti e *stakeholders*. Il laboratorio è stato progettato in accordo ai 20 Imperatives della Living Building Challenge, un protocollo internazionale di certificazione della sostenibilità degli edifici. Il nuovo spazio integra quindi strategie passive e attive di progettazione per promuovere un modello di aula innovativo, a ridotto impatto ambientale, energeticamente efficiente e confortevole, tra cui: elevate prestazioni di involucro, utilizzo di materiali eco-compatibili e naturali, recupero e riutilizzo delle acque meteoriche. La realizzazione del laboratorio ha previsto l'utilizzo di una tecnologia prefabbricata a pannelli SIP, in modo da ridurre l'impatto del cantiere sulle attività scolastiche nell'edificio limitrofo.

CS.12 Bertschi School Living Lab

Concept architettonico-spaziale	Il laboratorio è formato dall'aggregazione di due unità modulari, a cui si aggiunge un <i>service pod</i> in cui sono state integrate e accentrate tutte le componenti di impianto. Tale scelta consente infatti di velocizzare le operazioni di messa in opera e di semplificare la connessione degli impianti con le reti infrastrutturali esistenti.
Tecnologia costruttiva	Il prototipo è realizzato con unità volumetriche modulari con struttura in pannelli SIP (Structural Insulated Panels), ovvero pannelli prefabbricati con struttura interna in schiuma rigida (PIR o PU espanso) confinata da pannelli esterni OSB (Oriented Strand Board). I moduli sono stati trasportati e installati in cantiere parzialmente finiti, e sono stati integrati e completati direttamente in sito.
Sistema di attacco a terra	---
Strategia di produzione industrializzata	Il progetto è stato sviluppato come una soluzione <i>ad hoc</i> e non è stata prevista una successiva produzione in ottica di commercializzazione vasta sul mercato. I pannelli SIP garantiscono comunque una certa flessibilità di customizzazione, essendo componenti semi-standardizzati personalizzabili negli aspetti dimensionali, di apertura, finitura interna ed esterna, ecc.
Strategie per la sostenibilità ambientale	L'edificio soddisfa il 20 Imperatives della Living Building Challenge, un programma di certificazione internazionale che richiede l'integrazione di strategie di sostenibilità come l'utilizzo di sistemi impiantistici ad elevata efficienza, la raccolta e il riutilizzo delle acque piovane, l'uso di materiali naturali e a basso impatto ambientale, riciclati e riciclabili.

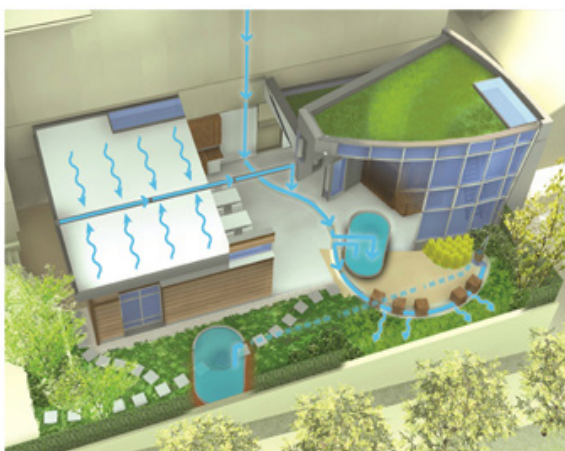


Fig.77 - Concept progettuale dell'intervento, che evidenzia le strategie di controllo ambientale passivo e di utilizzo razionale delle risorse naturali (Credits: © GGLO da Whol Building Design Guide: www.wbdg.org)



Fig.78 - Interno del Bertschi School Living Lab. I materiali di finitura utilizzati sono stati selezionati per essere eco-compatibili e riciclabili (Credits: © Bertschi School da www.living-future.org)

Bibliografia e sitografia

Dettagli del progetto: <https://living-future.org/lbc/case-studies/bertschi-living-building-science-wing/>

KMD Architects: <https://www.kmdarchitects.com/>

Living Building Challenge: <https://living-future.org/lbc/>

CS.13 Harvard Yard Child Care Center



Fig.79 - Vista dell'Harvard Yard Child Care Center, realizzato attraverso moduli prefabbricati in un'area destinata a parcheggio all'interno del campus dell'Harvard University (Credits: Triumph Modular da www.triumphmodular.com)

Dati

Progettista/azienda	Anderson Anderson Architecture
Luogo	Cambridge (MA), USA
Anno	2009
Tipo di intervento	Ampliamento di breve periodo
Tempi di realizzazione	---
Costo dell'intervento	---

Descrizione

Nell'ambito del programma di riqualificazione del campus dell'Harvard University, l'edificio che ospitava il Child Care Center è stato reso indisponibile per circa due anni. Tale condizione ha generato la necessità di disporre di una soluzione alternativa per ospitare le funzioni didattiche, ma le soluzioni modulari immediatamente disponibili sul mercato sono state giudicate inefficaci in termini di qualità degli spazi da realizzare. Per questo motivo, lo studio Anderson Anderson Architecture ha sviluppato, in collaborazione con Triumph Modular, il progetto per una aula modulare che fosse sostenibile ed energeticamente efficiente, pur mantenendo i costi di intervento allineati a quelli delle soluzioni standard *containerizzate*. La strategia per indirizzare tale necessità è stata quella di partire dall'aggregazione di elementi componibili standardizzati, che sono stati customizzati sostituendo ai materiali tradizionali opzioni a ridotto impatto ambientale, selezionando materiali eco-compatibili e a bassa intensità energetica. Il modello di unità scolastica, dopo una prima fase di test e valutazione delle prestazioni, è stato integrato dall'azienda produttrice all'interno del proprio catalogo di soluzioni per le emergenze scolastiche, e risulta oggi immediatamente acquistabile e/o noleggiabile per la realizzazione di ampliamenti di breve e medio periodo.

CS.13 Harvard Yard Child Care Center

Concept architettonico-spaziale	Le unità modulari sono aggregate in uno schema a blocco lineare con distribuzione centrale a corridoio. Al fine di conferire una maggiore dinamicità allo spazio interno, le partizioni nel corridoio centrale sono state ruotate per creare piccole nicchie e spazi di raccoglimento personale per gli studenti.
Tecnologia costruttiva	L'edificio è realizzato con un sistema a unità modulari prefabbricate con struttura portante a telaio in legno e chiusure a telaio leggero in legno (<i>platform frame</i>).
Sistema di attacco a terra	Le unità modulari sono state installate su un sistema di supporti lineari prefabbricati, appoggiati sulla pavimentazione esistente. Tale soluzione è stata scelta in considerazione della necessità di provvedere alla dismissione dei moduli una volta esaurito l'uso della struttura scolastica, ripristinando il sito per gli usi inizialmente previsti.
Strategia di produzione industrializzata	La produzione dei moduli è orientata ad un approccio di customizzazione di massa, ovvero a partire da elementi costruttivi standardizzati è possibile aggregare le unità secondo configurazioni variabili e personalizzabili sulla base delle necessità del progetto, in termini dimensionali, di configurazione spaziale interna, di finiture e materiali utilizzati.
Strategie per la sostenibilità ambientale	Le principali caratteristiche di sostenibilità del progetto sono veicolate dall'uso di materiali eco-compatibili e con ridotto impatto del ciclo di vita, utilizzati in sostituzione di quelli maggiormente energivori che contraddistinguono la produzione standard delle <i>portable classroom</i> dell'azienda Triumph Modular.

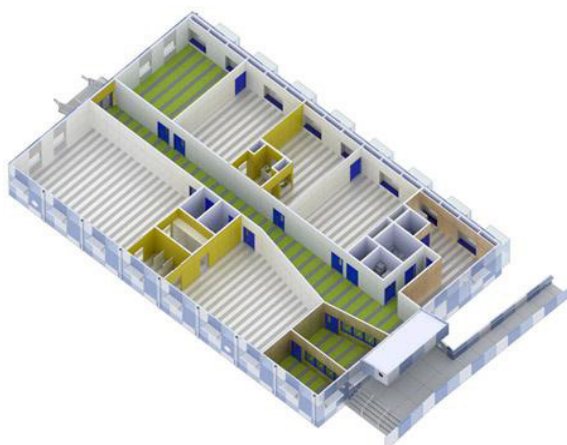


Fig.80 - Assonometria di progetto, che mostra le strategie di aggregazione spaziale dei moduli (Credits: © Anderson Anderson Architecture da www.world-architects.com)



Fig.81 - Le unità modulari sono state pre-assemblate e completate in officina, quindi trasportate in sito per l'installazione (Credits: © Anderson Anderson Architecture)

Bibliografia e sitografia

Anderson Anderson Architecture: <https://andersonanderson.com/>

Triumph Modular: <https://www.triumphmodular.com/>

Dettagli del progetto:

Smith, R.E. (2010) *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. Wiley.

CS.14 Het4e Gymnasium



Fig.82 - Vista esterna del Het4e Gymnasium, oggi dismesso (Credits: © John Lewis Marshall da www.divisare.com)

Dati

Progettista/azienda	HVDN Architects
Luogo	Amsterdam, Olanda
Anno	2008
Tipo di intervento	Edificio scolastico volante
Tempi di realizzazione	4.5 milioni €
Costo dell'intervento	200 giorni

Descrizione

Nel 2007 l'area di Houthavens è stata oggetto di un piano di sviluppo per la sua trasformazione da un'area urbana fortemente degradata a polo attrattivo e rappresentativo della comunità locale. Il piano prevedeva anche la realizzazione del nuovo edificio del Het4e Gymnasium ma, poiché erano stati stimati più di cinque anni per il completamento dell'opera, è stato necessario realizzare una scuola volante, in prossimità del sito su cui sarebbe sorta quella "permanente". Per il progetto, lo studio olandese HVDN Architects ha deciso di impiegare un sistema costruttivo basato su unità modulari prodotte industrialmente, aggregandole intorno ad uno spazio centrale aperto che si configura come un'agorà, un luogo collettivo di socializzazione aperto al quartiere. Parte del programma di infrastrutturazione dell'area prevedeva anche la realizzazione di uno studentato in prossimità della scuola volante, anch'esso realizzato attraverso moduli prefabbricati containerizzati. Al termine dell'uso dell'edificio, il piano originale prevedeva lo spostamento e ricollocamento delle unità in altri siti della città, oggetto di programmi di riqualificazione analoghi a quello di Houthavens. Tuttavia, il fallimento dell'azienda produttrice, unito ai costi eccessivi richiesti all'amministrazione pubblica per lo smontaggio, manutenzione e re-installazione dei moduli non ha permesso di attuare il piano iniziale, e i moduli sono stati dismessi nel 2016.

CS.14 Het4e Gymnasium

Concept architettonico-spaziale	Le unità modulari sono aggregate secondo uno schema a corte, in cui lo spazio centrale funge da agorà, ovvero da spazio pubblico di aggregazione che si apre alla comunità del quartiere. Lo spazio è infatti pensato per accogliere non solo momenti di apprendimento informale, ma anche eventi a scala di quartiere, mostre e concerti.
Tecnologia costruttiva	L'edificio è formato da unità modulari con struttura in acciaio, chiuse da sistemi di facciata anch'essi prefabbricati con sotto-struttura in acciaio e rivestimento in doghe di legno. Tale soluzione è stata selezionata per garantire la massima rapidità di intervento, oltre che per ridurre al minimo le operazioni di completamento in sito.
Sistema di attacco a terra	L'edificio è stato realizzato su un sistema di fondazione in calcestruzzo gettato in opera; tuttavia, anche il sistema di connessione al suolo è stato dismesso nel 2016, e il sito è stato rinaturalizzato per essere usato come spazio verde in continuità con il nuovo campus scolastico.
Strategia di produzione industrializzata	La produzione delle unità modulari è stata approntata ad hoc per il progetto, e non è stata prevista una strategia di più vasta commercializzazione sul mercato.
Strategie per la sostenibilità ambientale	---



Fig.83 - Le unità modulari sono state pre-assemblate e completate con finiture e impianti, quindi trasportate in sito per l'installazione (Credits: Foto di © Lorenzo Calistri, HVDN architecten design team (Albert Herder, Arie van der Neut) da www.indire.com)



Fig.84 - L'utilizzo di unità prefabbricate ha consentito di ridurre sostanzialmente i tempi di messa in opera rispetto a tecniche tradizionali, rendendo l'edificio disponibile in tempo utile all'inizio dell'attività scolastica (Credits: Foto di © Lorenzo Calistri, HVDN architecten design team (Albert Herder, Arie van der Neut) da www.indire.com)

Bibliografia e sitografia

HVDN Architects: <http://www.hvdn.nl/2111/projecten/proate.htm>

Project details: <https://www.indire.it/quandolospazioinsegna/scuole/4het-gymnasium/>

Local news: <https://www.dewestkrant.nl/toch-slooptogel-4e-gymnasium-194/>

Le informazioni, immagini e disegni tecnici riportati nelle schede sono stati forniti da HVDN Architects (ora Studio-ninedots). Tutti i contenuti sono di esclusiva proprietà del titolare.

CS.15 Westborough Primary School Cardboard Building



Fig.85 - Vista esterna del Wesborough School Cardboard Building (Credits: © Peter Grant da www.cv-arch.co.uk/)

Dati

Progettista/azienda	Cottrell & Vermeulen Architecture
Luogo	Westcliff-on-Sea, UK
Anno	2002
Tipo di intervento	Ampliamento di lungo periodo
Tempi di realizzazione	200 000 €
Costo dell'intervento	---

Descrizione

La Westborough Primary School è uno dei primi esempi di edificio scolastico realizzato utilizzando il cartone come materiale costruttivo. Il progetto è stato finanziato dal Dipartimento dell'Ambiente, dei Trasporti e delle Regioni (DETR) inglese attraverso il programma "Partners in Innovation". L'edificio costituisce un ampliamento di lungo termine della scuola esistente, in cui ospitare funzioni collettive e didattiche diversificate. A livello distributivo si configura come uno spazio unico a pianta libera, a cui sono affiancati due nuclei di servizi e cucina. L'obiettivo strategico del progetto è stato quello di testare l'applicazione del cartone come materiale da costruzione (in combinazione con il legno) per realizzare componenti strutturali e di completamento, tra cui colonne e capriate, pannelli per pareti, coperture e mobili. L'edificio è realizzato utilizzando il 90% di materiale riciclato, attraverso un processo di approvvigionamento che ha visto gli stessi alunni coinvolti nella raccolta del cartone; inoltre, per ridurre ulteriormente il costo di costruzione, i progettisti hanno ottenuto materiale di scarto gratuitamente dalle aziende, da cui sono stati successivamente ricavati gli elementi costruttivi. Tale espediente ha consentito di bilanciare i sovra-costi necessari al trattamento del cartone per garantirne la durabilità, essendo l'edificio progettato per un tempo di vita utile di circa 20 anni.

CS.15 Westborough Primary School Cardboard Building	
Concept architettonico-spaziale	L'aula scolastica si sviluppa in un corpo unico a blocco con pianta libera, ovvero in uno spazio facilmente riprogrammabile e configurabile secondo le esigenze del programma pedagogico. Tale caratteristica è resa possibile dall'uso di elementi lineari a telaio per le strutture, che svincolano l'architettura dalla rigidità imposta, per esempio, dalla ripetizione di unità modulari pre-assemblate.
Tecnologia costruttiva	La tecnologia costruttiva si basa sull'uso di elementi lineari (travi e pilastri) realizzati con tubolari di cartone e supporti in legno. Il materiale è utilizzato anche per la realizzazione di pannellature leggere alveolari di chiusura verticale e orizzontale, oltre che per le condutture della ventilazione.
Sistema di attacco a terra	---
Strategia di produzione industrializzata	La costruzione dell'edificio è stata approntata come un processo sperimentale, e non è stata prevista una strategia di commercializzazione. La realizzazione si è basata su elementi comunemente disponibili sul mercato come i tubolari in cartone in dimensioni standardizzate, che sono stati successivamente modificati per assecondare le esigenze del progetto.
Strategie per la sostenibilità ambientale	Il materiale utilizzato per la costruzione proviene al 90% da fonti di riciclo, ed è stato approvvigionato da produttori locali come risorsa di scarto oppure ricercato dagli studenti stessi, che sono stati coinvolti nel progetto fin dalle fasi di concept dell'aula. I trattamenti esterni e le modalità di connessione sono stati studiati e scelti per garantire le future possibilità di dismissione selettiva, riuso e/o riciclaggio dei componenti costruttivi.

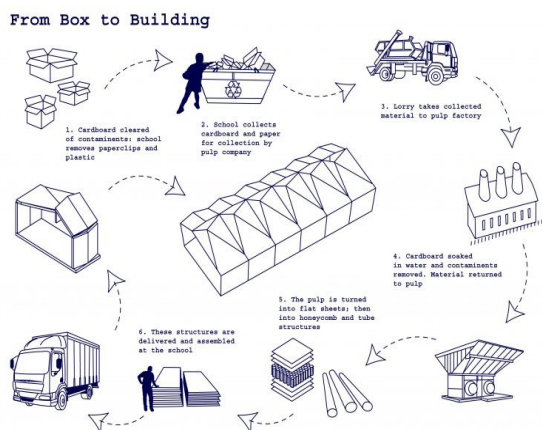


Fig.86 - Il concept di progetto si basa sul principio della circolarità delle risorse materiali, in particolare del cartone utilizzato per la realizzazione degli elementi costruttivi (Credits: Cottrell & Vermeulen Architecture)



Fig.87 - Vista interna dell'aula; il cartone è stato utilizzato non solo come materiale strutturale, ma anche – dove possibile – per gli impianti, le finiture interne e i sistemi di partizione (Credits: © Peter Grant da www.cv-arch.co.uk/)

Bibliografia e sitografia

Cottrell & Vermeulen Architecture: <https://www.cv-arch.co.uk/>

Dettagli del progetto:

<https://www.ajbuildingslibrary.co.uk/projects/display/id/3679>

Cripps, A. (2004) *Building with cardboard: the reality* [Online] Available at: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB2464.pdf> (Accessed: 05th January 2022)

Cripps, A. (2004). Cardboard as a construction material: a case study. *Building Research & Information*, 32(3), 207–219.

Rogora, A. (a cura di) (2006), *Carta e cartone in edilizia*. Edicom, Monfalcone, 31-36.

















































































3.4. Risultati: criticità e domande aperte

L'osservazione dei risultati dell'analisi dei casi studio prospetta un netto contrasto tra le esperienze sviluppate nel panorama italiano e quelle internazionali (Tab.04). La linea di demarcazione si imposta sugli attributi qualitativi dello spazio scolastico sulla qualità delle soluzioni tecnologiche impiegate che, nel contesto nazionale, risultano sotto-dimensionati e inadeguati rispetto al quadro esigenziale, sia in termini di valore architettonico che di impatto ambientale dei manufatti. Per quanto attiene al primo aspetto, emerge come le soluzioni messe in campo per fronteggiare le emergenze scolastiche in Italia, che prevedono in maniera prevalente l'utilizzo di moduli *containerizzati* (CS.01, CS.02, CS.10), presentino molti limiti e un grado ridotto di rispondenza alle istanze del progetto di ambienti scolastici. Si tratta infatti di moduli pre-assemblati, prodotti in serie a partire da componenti standardizzati da aziende che ne hanno generalmente disponibilità immediata; il mantenimento dello stock è giustificato dal fatto che sono prodotti destinati e pensati per settori di impiego in cui vi è una domanda costante, come cantieri, allestimenti fieristici/sportivi ed eventi temporanei, e solo in caso di necessità vengono convertiti per l'edilizia scolastica. L'uso occasionale e il tipo di funzione per cui sono pensati spiegano perché le unità *containerizzate* siano realizzate con standard prestazionali e di comfort minimi, adatti ad essere fruiti solo per brevi periodi di tempo. Per quanto attiene invece alle aggregazioni spaziali, la flessibilità delle configurazioni risulta ostacolata dai limiti dimensionali dei moduli impiegati, risultando in rigidi schemi a blocco in cui le aule si susseguono lungo un corridoio di distribuzione, centrale o esterno, che priva la scuola di spazi aggregativi e/o per attività di carattere informale. Ma se questo aspetto può, in certi casi, essere accettato in virtù della provvisorietà e della condizione di urgenza, è da considerare che le dimensioni dei moduli, in conseguenza del loro essere destinati prioritariamente ad altri settori di impiego, richiedono la deroga ai dimensionamenti minimi stabiliti dalla normativa per la progettazione di edifici scolastici (D.M. 18 dicembre 1975), oltre che essere in aperto contrasto con le più recenti Linee Guida Ministeriali per la realizzazione di ambienti di apprendimento.

Nel contesto italiano, un esempio di *best practice* che emerge dalle esperienze analizzate è quello della Scuola Mantovani e Gonnelli (CS.10), uno degli Edifici Scolastici Temporanei (EST) per il post-sisma in Emilia Romagna (2012); la scuola è stata infatti costruita adottando principi di elevate qualità costruttiva e architettonica, e caratterizzando lo spazio come un ambiente didattico innovativo, rispondente ai più recenti indirizzi pedagogici. Tale volontà deve essere però letta in relazione ad un tempo di uso stimato per l'edificio significativamente più lungo rispetto ai moduli *containerizzati*⁵, che ne ha giustificato un maggiore sforzo, anche economico, nei livelli di qualità prodotti.

Dal punto di vista dei materiali impiegati, le soluzioni *containerizzate* utilizzano strutture in acciaio e tamponamenti in pannelli in acciaio coibentati con schiume poliuretaniche; dall'analisi della letteratura scientifica di riferimento, emerge come i processi di produzione e smaltimento di tali componenti risultano particolarmente energivori e ad elevate intensità di emissioni. Rispetto al tema della sostenibilità ambientale, nel contesto internazionale si sono invece rintracciati esempi di utilizzo virtuoso di materiali altamente eco-compatibili, che sfruttano risorse locali e naturali, con ridotto impatto del ciclo di vita e spiccata circolarità (CS.03, CS.04, CS.07, CS.08, CS.12, CS.13, CS.15). Un approccio che si rivela non solo funzionale ad assecondare la provvisorietà intrinseca delle soluzioni di emergenza, assicurando le possibilità di riciclo/riuso dei componenti e dei materiali a fine vita, ma che viene utilizzato anche come strumento didattico, ovvero per accrescere la consapevolezza degli studenti sull'utilizzo razionale delle risorse materiali. Uno dei casi più emblematici in questo senso è quello della Westborough School (CS.15), un'aula scolastica realizzata impiegando il cartone come materiale costruttivo, che è stato reperito da fonti di riciclo direttamente dagli studenti e dalle loro famiglie. Si tratta infatti di un materiale con elevate caratteristiche di eco-compatibilità, rispetto al

Tab.04 - Quadro riassuntivo dell'analisi dei casi studio

Casi studio	Parole chiave				
					
	Semplicità e rapidità di esecuzione, anche con l'ausilio di manodopera non specializzata e mezzi ordinari	Reversibilità dell'intervento	Efficienza energetica	Utilizzo di materiali naturali, eco-compatibili e a ridotto impatto	Flessibilità e customizzabilità della soluzione architettonico-edilizia
01. Ampliamento del Campus Scolastico a Pontedera					
02. Scuola Secondaria di Secondo grado "Paladini e Civitali"					
03. Lavington ECO Classroom					
04. Sawley Junior School					
05. Waldorf Elementary School					
06. Energy-Positive Relocatable Classroom					
07. Perkins SEED Classroom					
08. Sprout Space					
09. Scuola Secondaria di Secondo Grado "M. Malpighi"					
10. Edificio scolastico temporaneo (EST) "Mantovani e Gonnelli"					
11. Gen7 Brentwood School					
12. Bertschi School Living Lab					
13. Harvard Yard Child Care Center					
14. Het4e Gymnasium					
15. Wesborough Primary School Carboard Building					

5. Nel caso degli EST, la connotazione "temporanea" è riferita all'utilizzo dell'edificio con funzione scolastica; una volta terminata la ricostruzione delle scuole esistenti, danneggiate dal terremoto, per gli EST è stata infatti prevista la riconversione come centri destinati ad attività collettive e/o sociali (Regione Emilia-Romagna, 2017).

quale le scelte tecnologiche di assemblaggio e completamento (rivestimenti, trattamenti esterni, ecc.) sono state specificatamente studiate e selezionate per assicurare la dismissibilità e la possibilità di riciclo dei componenti al termine dell'uso dell'aula.

Un altro elemento di forte criticità nel contesto nazionale riguarda l'efficienza energetica e la qualità ambientale delle architetture scolastiche di emergenza. Seppure non si siano ritrovati studi specifici in merito alle prestazioni in uso dei manufatti, l'analisi delle schede prodotto fornite dalle aziende fa emergere come le unità modulari presentino livelli minimi di prestazione di involucro, in molti casi non rispondenti agli standard normative prescritti dalla normativa CAM per l'edilizia pubblica. Lo stesso può dirsi della qualità ambientale indoor (ventilazione e illuminazione naturale, comfort acustico), che presenta condizioni vivibili solo per poche ore nel corso della giornata e per periodi di tempo limitati. Tra le esperienze analizzate in ambito estero, vi sono invece riferimenti di strategie improntate ad una elevata qualità ed efficienza energetica dei manufatti emergenziali, che vengono utilizzate anche come strategia propedeutica al contenimento dei costi durante la fase di uso e gestione (CS.05, CS.06, CS.07, CS.11). Tra questi, si segnalano gli esempi della Energy Positive Relocatable Classroom (CS.06) e la Brentwood Gen7 School (CS.11) in cui sono stati integrati sistemi di monitoraggio e condivisione real-time dei dati riguardanti i consumi degli edifici (energia per il riscaldamento e raffrescamento, consumi elettrici e idrici). In questi casi, un ulteriore elemento di valore consiste nel fatto che le strategie di sostenibilità sono state sfruttate come un veicolo di comunicazione per tutta la comunità scolastica circa la virtuosità dell'edificio, che educa ad una cultura consapevole e rispettosa dell'uso delle risorse.

In ottica di gestione a fine vita dei manufatti, una delle criticità condivisa da molti dei casi studio analizzati riguarda la reversibilità dell'installazione. Nello specifico, il paradosso che si nota è che, nonostante le tecnologie costruttive siano improntate a principi di assemblaggio a secco e dismissibilità dei manufatti, l'installazione dei componenti avviene su sistemi di fondazione tradizionali in calcestruzzo gettato in opera. Si tratta di una soluzione che limita fortemente le possibilità di ripristino del sito, promuovendo un'infrastrutturazione permanente delle aree oggetto di intervento. Una direzione alternativa si ritrova in alcuni esempi come la Sawley Junior School (CS.04) e la Energy Positive Relocatable Classroom (CS.06), che hanno invece previsto l'installazione dei manufatti su sistemi di fondazione reversibile, del tipo a pali infissi nel terreno o attraverso appoggi lineari in acciaio, che possono essere dismessi, al pari dei componenti dell'edificio, una volta disinstallate le aule.

Le considerazioni scaturite dall'analisi dei casi studio, circoscritte nel contesto di intervento italiano, mettono in luce una serie di punti critici rispetto allo stato dell'arte nazionale, fortemente arretrato rispetto invece alle esperienze virtuose sviluppate a livello internazionale. Da tale confronto si conclude che gli sforzi di ricerca per incrementare la qualità di prodotto/processo edilizio nell'ambito emergenziale scolastico siano non solo inediti nell'attuale panorama nazionale, ma risultano necessari ad offrire contemporaneamente spazi appropriati alle esigenze di crescita e manufatti edilizi sostenibili, che abbiano un ridotto impatto sull'ambiente e che promuovano logiche di sostenibilità del sistema costruito. Riassumendo e interpretando criticamente queste riflessioni, anche alla luce del quadro conoscitivo che si è tratteggiato nei capitoli precedenti, si rafforza la prospettiva di dover rispondere ad un quadro di esigenze improntato alla qualità e alla sostenibilità delle infrastrutture per la gestione delle emergenze scolastiche, che rappresenta un punto di partenza per sperimentare approcci innovativi alla produzione edilizia, e in particolare quella che guarda alla prefabbricazione industriale dei componenti costruttivi, che siano trasferibili e scalabili a tutte le nuove forme emergenti di abitare transitorio.

Conclusioni

L'intero settore AEC si confronta oggi con una serie di problematiche, di natura economico-ambientale, che devono essere risolte al fine di indirizzare gli obiettivi di sostenibilità stabiliti dalla programmazione internazionale per l'immediato futuro: azzeramento delle emissioni e neutralità climatica, riduzione della produzione dei rifiuti, miglioramento della qualità e della prevedibilità dei prodotti e dei processi edilizi. Per raggiungere tali obiettivi, l'approccio tradizionale alle costruzioni si sta ridefinendo nella prospettiva di trasferire le sequenze realizzative dal cantiere alla fabbrica, un ambiente sicuro, non influenzato da fattori esterni, in cui la prefabbricazione di componenti e/o parti dell'edificio avviene sotto uno stretto controllo qualitativo, garantendo la prevedibilità e la certezza delle prestazioni finali, il rispetto dei tempi e dei costi di intervento, l'ottimizzazione e razionalizzazione delle risorse. Contemporaneamente, l'intero processo edilizio, e quindi anche la progettazione, sta evolvendo in funzione del binomio di transizione ecologica-digitale sospinto dalla Comunità Europea, adottando l'informatizzazione delle fasi e delle informazioni delle opere edili come il paradigma strumentale ad ottimizzare le filiere di uso e consumo dei materiali, a migliorare i flussi comunicativi tra gli operatori e assicurare la qualità ed efficienza del sistema costruito.

Lo scenario di trasformazione che si prospetta viene inquadrato nell'ambito di un contesto applicativo, quello dell'edilizia scolastica emergenziale, che in funzione degli interventi previsti nel prossimo futuro, può rappresentare il campo di prova per la sperimentazione di metodi, tecniche e approcci innovativi al progetto di architettura, scalabile e trasferibile alle nuove forme transitorie di abitare. Le infrastrutture per l'educazione sono infatti attualmente rese vulnerabili da una serie di carenze, qualitative e quantitative, che compromettono la possibilità di fruire di forme adeguate di educazione scolastica. Per correggere tali elementi di rischio, all'edilizia scolastica sono state destinate ingenti linee di finanziamento volte al potenziamento delle infrastrutture. Nell'ambito di questi programmi, si aprono per le discipline tecnologiche dell'architettura interessanti possibilità per esplorare approcci inediti al progetto e realizzazione degli interventi, anche suggeriti dalle esperienze di ricerca sulle architetture emergenziali e delle tecnologie costruttive *low-tech*.

La linea di intervento che consente di raggiungere obiettivi di qualità e sostenibilità richiede di sviluppare soluzioni progettuali e modelli di processo edilizio in grado di coniugare le istanze del progetto emergenziale – rapidità di intervento, semplicità di messa in opera, economicità – con quelle di sostenibilità ambientale, uso razionale delle risorse, ciclicità, ma anche inclusività, flessibilità e adattabilità. Nel campo di sperimentazione che si delinea, i contenuti di ricerca finora prodotti non sono riusciti a consolidarsi come offerta stabile sul mercato; tuttavia, il contesto culturale e normativo attuale prefigura nuove possibilità di recepimento degli esiti di tutte quelle ricerche che promuovono, in linea con gli obiettivi di programmazione, l'incremento della sostenibilità del ciclo di vita dei manufatti e il potenziamento delle qualità del processo edilizio.

[The computer]
*was the first machine
man built that assisted
the power of his brain
instead of the strength of his arm.*

Grace Hopper, 1987

pt. II

**Materiali,
tecniche e
metodi di
produzione**

You Can Build It!



University of California
Housing Advisory Service Project
Edition

SAMPLE

II.1 Evoluzione storica delle tecniche di prefabbricazione

1.1. Premesse

Lo stato dell'arte delle tecnologie per la prefabbricazione edilizia risulta da un percorso di evoluzione che si snoda progressivamente lungo tutto il corso della storia dell'architettura. L'idea di prefabbricare gli edifici è infatti una possibilità esplorata fin dall'antichità "per necessità o desiderio" (Timberlake, 2003, Cit. in D'Emilio, 2016, p. 94), che ha assunto nel corso dei secoli connotazioni eterogenee per tecniche, approcci e campi di applicazione. Già nelle comunità nomadi della Preistoria, l'uomo faceva ricorso a tali tecnologie per la produzione di "parti" di edifici che potessero essere facilmente e rapidamente trasportati, assemblati e disassemblati ciclicamente a seconda delle necessità di spostamento della comunità. Nella loro rilettura moderna, i sistemi edilizi prefabbricati sono poi divenuti tecnologie industrializzate, ovvero fabbricate fuori opera attraverso sequenze affini a quelle della produzione industriale. Dalla prima metà del Novecento si è infatti aperta la strada ad una visione dell'architettura "dominata dall'idea del produrre" (Cetica, 1993, p. 7), ovvero ad un approccio alla progettualità che sfruttava i potenziali della reiterazione industriale per produrre, al pari di tutti gli altri beni di consumo, edifici economici e funzionali alla risposta alle emergenze abitative del tempo (ricostruzione del dopoguerra, aumento demografico, rapida urbanizzazione). Una risposta che, tuttavia, si è successivamente rivelata non del tutto esauriente. Se da un lato è innegabile che la produzione industriale per l'edilizia abbia contribuito a diminuire drasticamente tempi e costi di costruzione, condizioni imprescindibili per fronteggiare le profonde crisi abitative del Novecento, si deve considerare che ciò è avvenuto a fronte di un approccio spiccatamente orientato alla produzione di massa e alla standardizzazione della produzione. La scarsa maturità del contesto tecnologico-produttivo ha quindi contribuito a far sedimentare l'idea secondo cui la prefabbricazione fosse sinonimo di monotonia, mancanza di espressività architettonica e scarsa qualità costruttiva. Limiti a cui possono essere imputate le ragioni per cui, nella seconda metà del Novecento, la prefabbricazione è stata parzialmente messa da parte, preferendo il ricorso a tecniche costruttive tradizionali che invece assecondavano maggiormente le esigenze di personalizzazione, rappresentatività e appropriazione degli edifici.

Dalla fine del Novecento, il tema della prefabbricazione edilizia è stato però nuovamente riportato al centro del dibattito scientifico, soprattutto in vista di un suo radicale ripensamento in chiave sostenibile e qualitativa. Dalla fine degli anni Ottanta, l'affermazione delle tecnologie del digitale ha infatti portato alla luce sistemi e strumenti innovativi per la gestione del processo edilizio, che oggi permettono di svincolare la produzione edilizia *off-site* da quelle logiche di produzione di massa e standardizzazione che ne hanno causato il fallimento in passato. Nel contesto attuale della Quarta Rivoluzione Industriale, sono oggi resi possibili processi industriali altamente flessibili, che consentono la personalizzazione di massa dei prodotti a fronte di una significativa riduzione dei tempi e dei costi di produzione. Ci tro-

viamo dunque nello scenario di una nuova modalità operativa che, pur adottando i principi della produzione industrializzata, ristabilisce la centralità del progetto di architettura e della sua componente espressiva, collocandosi a metà strada tra una pratica di “composizione industriale” e di “artigianalità virtuale” (Zanelli *et al.*, 2010, p. IX). Contemporaneamente, le capacità computazionali e predittive dei nuovi strumenti gestionali del progetto-produzione (BIM, CAD/CAM, manifattura di precisione) garantiscono l’ottenimento di elevati standard di qualità, altrimenti preclusi, prefigurando “una fase di prefabbricazione tutta virtuale” (Zanelli *et al.*, 2010, p. X) in cui è possibile incorporare, testandone le prestazioni, gli specifici prodotti edilizi, integrare informazioni e competenze dei diversi specialisti coinvolti, stimare tempi e costi di intervento, simulare le performance finali, anticipare le opzioni di personalizzazione dell’edificio e degli spazi. Si apre la prospettiva di una *industrializzazione sostenibile*, che sfrutta i paradigmi della transizione digitale per riprodurre scenari operativi indirizzati alla qualità del costruito, in termini di prevedibilità dei prodotti e dei processi edilizi, di ottimizzazione delle risorse (materiali e immateriali), di adattabilità e declinabilità del progetto secondo le istanze locali, rispondendo contemporaneamente alle esigenze dell’utenza e alle richieste del comparto produttivo.

Alla luce dei radicali cambiamenti che hanno investito il campo di sperimentazione sulla prefabbricazione edilizia, i capitoli successivi ne ripercorrono le principali tappe del percorso di evoluzione con l’intento di descrivere un quadro conoscitivo che, a partire dalle cause storiche di insuccesso, individui in positivo le direzioni di ricerca attive sul tema.

Fig.1 (prima pagina) -
Copertina di una brochure del 1978, che propone una guida per l'auto-costruzione di abitazioni sulla base di kit di componenti costruttivi prefabbricati (Credits: University of California Housing Advisory Service Project Edition/Cover photo © Maia Sotor)

1.2. Dalle origini della prefabbricazione alla produzione industrializzata

I primi esempi che testimoniano l'uso di tecniche di prefabbricazione risalgono al Paleolitico superiore, in cui erano in uso veri e propri "kit" di componenti edilizi, composti prevalentemente di tronchi di legno e tessuti, che venivano impiegati dalle comunità nomadi per la predisposizione delle tende nei villaggi provvisori. Ne sono un esempio le capanne aurignaciane, ritrovate nella grotta di Auriga (Francia) e risalenti a circa 30.000 anni fa: unità abitative composte da componenti pre-tagliati per essere facilmente trasportati, assemblati e disassemblati secondo le esigenze di viaggio e stanziamento della comunità (Cascone *et al.*, 2018) (Fig.2). Continuamente in viaggio alla ricerca di territori adatti per la sopravvivenza, i nomadi necessitavano infatti di *shelter* provvisori in cui alloggiare ma, per evitare di dover ricercare materiali ad ogni sosta, iniziarono a realizzare tende con elementi che potevano essere assemblati provvisoriamente, quindi smontati e trasportati per essere ricostruiti nel sito successivo, ricorrendo ad un numero limitato di elementi, leggeri e facilmente manovrabili. Si tratta di un archetipo che è sopravvissuto fino alla contemporaneità con la *jurta*, il modello di tenda ancora oggi in uso presso le comunità nomadi asiatiche (mongoli, kirghisi, kazaki), che può essere considerato come uno dei primi esempi di edilizia concepita per sistemi aggregabili (Staib *et al.*, 2007).



Fig.2 - Ricostruzione di un archetipo di capanna del periodo Paleolitico presso il Museo Civico per la Preistoria del Monte Cetona (Siena)
(Credits: © AMAT Associazione Musei Archeologici della Toscana: <http://www.archeologiatoscana.it/>)

L'implementazione delle tecniche di prefabbricazione nell'accezione più moderna, intesa come produzione fuori opera di componenti edilizi, ha inizio invece a partire dal XVI secolo, e riguarda lo sviluppo delle tecnologie del legno, dell'acciaio e del calcestruzzo. La loro diffusione è stata supportata dalle possibilità svelate dalla Rivoluzione Industriale: aumento della produttività, possibilità di produrre in massa elementi costruttivi e connessioni (chiodi, viti, bulloni), riduzione dei costi grazie alle economie di scala e alla razionalizzazione della produzione, rapida crescita delle infrastrutture per i trasporti.

La prefabbricazione con le tecnologie del legno ha inizio dalla metà del Seicento, contestualmente all'avvio della colonizzazione britannica del Medio Oriente, dell'Australia e Nuova Zelanda, dell'Africa e del Nord America. In questo contesto, la prefabbricazione edilizia nasce come risposta all'esigenza di realizzazione dei nuovi insediamenti: i coloni inglesi, non avendo familiarità con i materiali e le tecniche costruttive del luogo, cominciarono a produrre

componenti edilizi in Inghilterra utilizzando il legno quale risorsa locale e abbondantemente disponibile, spedendoli poi nelle colonie per essere assemblati in sito. Il primo caso di impiego di tale strategia è quello del **villaggio di Cape Ann** nell'attuale stato del Massachusetts (USA) nel 1624; qui i coloni inglesi per la prima volta spedirono un "kit" di componenti edilizi in legno, composto da pannelli leggeri a telaio per pareti, coperture e pavimenti, nonché da elementi di finitura e infissi, che dovevano essere assemblati in breve tempo per realizzare abitazioni, negozi e luoghi di aggregazione sociale. Questa prima esperienza fu ripresa e applicata per tutto il corso dei due secoli successivi, poiché offriva un metodo semplice e rapido per supportare l'infrastrutturazione dei territori colonizzati. Nel 1830, il carpentiere londinese H. John Manning lo adoperò nella realizzazione del **Portable Cottage for Emigrants**, il primo esempio di modello standardizzato di una unità residenziale, costruito attraverso un sistema di elementi prefabbricati a telaio leggero in legno (montanti e traversi) (Fig.3). Incoraggiati dai successi precedenti, gli inglesi sposarono il progetto di Manning come parte integrante del progetto di espansione coloniale in Africa e Nuova Zelanda. Dal punto di vista progettuale, il Portable Cottage for Emigrants rappresentava l'evoluzione dei sistemi impiegati nel 1700, ed era concepito come un insieme di elementi standardizzati ma intercambiabili, componibili secondo un set di regole di coordinazione dimensionale. Oltretutto, nonostante non vi siano fonti che ne approfondiscono i legami di relazione, gli storici sono concordi nell'attribuire al progetto di Manning il ruolo di propulsore dello sviluppo del *balloon frame* negli Stati Uniti, tecnica costruttiva largamente impiegata per gli insediamenti minerari durante il periodo della "corsa all'oro" nordamericana, poi evoluta nel moderno *platform frame* (Arieff e Burkhart, 2002).

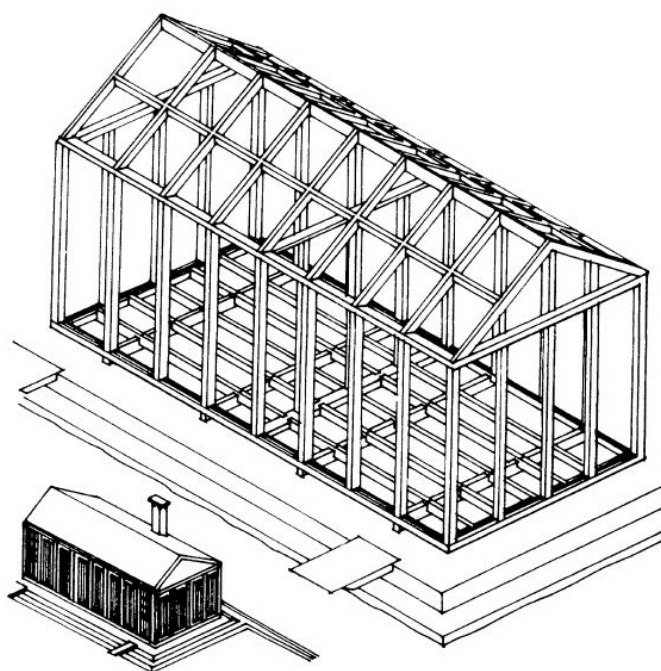


Fig.3 - Manning Portable Cottage for Emigrants (H. John Manning, 1830) (Credits: Smith, R. S. (2010) Prefab Architecture. A Guide to Modular Design and Construction. Inc, John Wiley & Sons © 2010 by John Wiley & Sons, Inc.)

Contemporaneamente allo sviluppo della prefabbricazione in legno, l'espansione coloniale inglese diede avvio alla sperimentazione sull'uso dell'acciaio, le cui tecnologie si affermarono rapidamente grazie alle caratteristiche intrinseche di elevata leggerezza e resistenza del materiale. Le prime esperienze riguardarono la realizzazione di opere di infrastrutturazione viaria; in particolare, la prima di cui si ha testimonianza è il ponte sul fiume Severn realizzato nel 1807 nel Regno Unito dalla Coalbrookdale Company Bridge, composto interamente di semilavorati in acciaio prodotti in fabbrica, trasportati e assemblati in sito attraverso connessioni anch'esse fabbricate in serie in officina. Le ricerche e le applicazioni in questa direzione si faranno via via sempre più frequenti fino al 1851, anno in cui Joseph Paxton ne consacrò definitivamente l'uso nel progetto del **Crystal Palace per l'Esposizione Universale a Londra** (Fig.4). Il padiglione rappresentava il trionfo delle logiche di standardizzazione e produzione di massa, essendo composto di elementi costruttivi prefiniti, prodotti all'interno di un'officina e poi assemblati in sito. Spingendosi oltre, il progetto di Paxton servì ad inaugurare un nuovo pensiero stilistico, che basava la qualità espressiva dell'architettura sulla propria funzionalità, ovvero su un linguaggio di uniformità derivato proprio dalla produzione seriale degli elementi costruttivi. Il passaggio a questo nuovo linguaggio fu confermato anni dopo anche dalle parole di Konrad Wachsmann, che definì l'opera come "un chiaro punto di svolta [...] attraverso cui si diede avvio ad un nuovo corso per l'intero sviluppo della storia dell'architettura"¹ (Staib, *et al.*, 2007). Il padiglione di Paxton segnò difatti l'inizio di una nuova stagione per la produzione edilizia che, sulla scia del fermento tecnologico della Rivoluzione Industriale, cominciò ad avvicinarsi a logiche di produzione in serie, razionalizzazione e standardizzazione per la produzione di massa di elementi e componenti costruttivi. Concetti che, nei primi anni del Novecento, verranno ripresi ed esplorati dai grandi maestri del Movimento Moderno in Europa, quale emblema dello spirito progressista della società novecentesca.

1. Trad. "A visible turning point [...] through which the entire development of building history started on a new course" (Staib *et al.*, 2007).

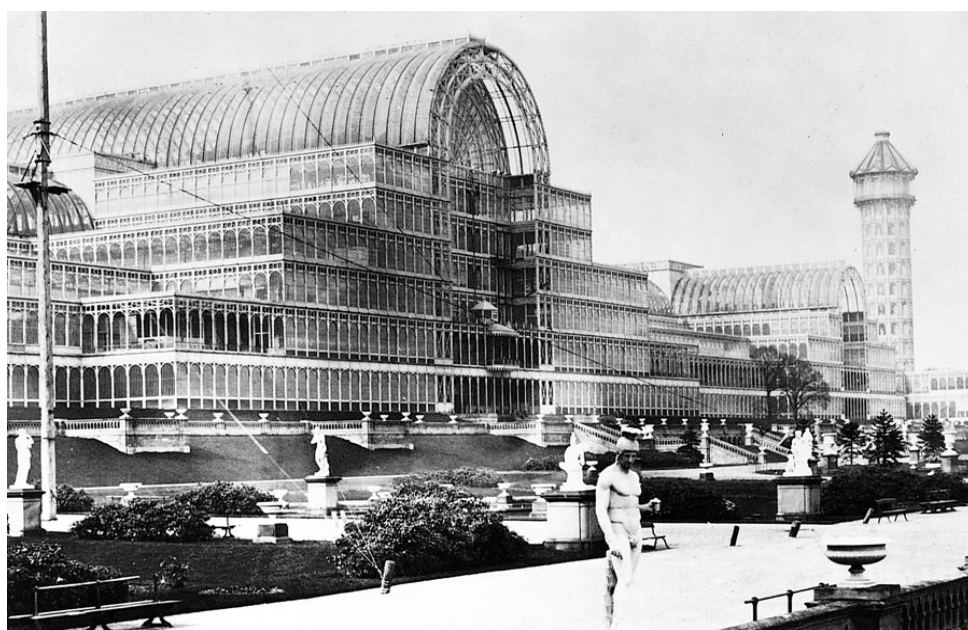


Fig.4 - Crystal Palace, Londra (UK) (Joseph Paxton, 1851-1936) (Credits: <https://www.artribune.com/attualita/2015/03/ex-expo-storia-europea-dellesposizione-universale/attachment/londra-1851-crystal-palace/>)

Analogamente, a partire dalla metà del Settecento prese avvio anche la ricerca sulle tecnologie di prefabbricazione in calcestruzzo; impiegato come materiale costruttivo già dai Romani, il suo uso fu riscoperto nel 1756, quando l'ingegnere inglese John Smeaton sperimentò l'uso della calce idraulica come materiale legante. Successivamente, l'uso del calcestruzzo fu innovato da una serie di esperienze che ne modificarono le modalità di produzione e messa in opera; tra queste, quella del giardiniere francese Joseph Monier, che nel 1867 brevettò la tecnologia del calcestruzzo armato. Si dovrà però attendere la fine del secolo per vedere lo sviluppo dei primi elementi prefabbricati in calcestruzzo, in particolare il 1891, quando l'industriale francese François Coignet verificò l'applicabilità del materiale alla produzione di elementi strutturali gettati fuori opera. Pochi anni più tardi, nel 1896, il costruttore François Hennebique sperimentò l'uso di tecniche di prefabbricazione in calcestruzzo per la realizzazione di unità modulari tridimensionali per le guardiole della ferrovia nazionale francese, con una tecnica che sarà ripresa e implementata nel 1908 da **Thomas Edison**. Quest'ultimo sperimentò per la prima volta la realizzazione di unità modulari in calcestruzzo armato attraverso la tecnica della colata singola in un'unica cassaforma in acciaio, tecnica che di nuovo ricorreva alla standardizzazione come principio produttivo funzionale a ridurre drasticamente tempi e costi di messa in opera (Staub *et al.*, 2007) (Fig.5).

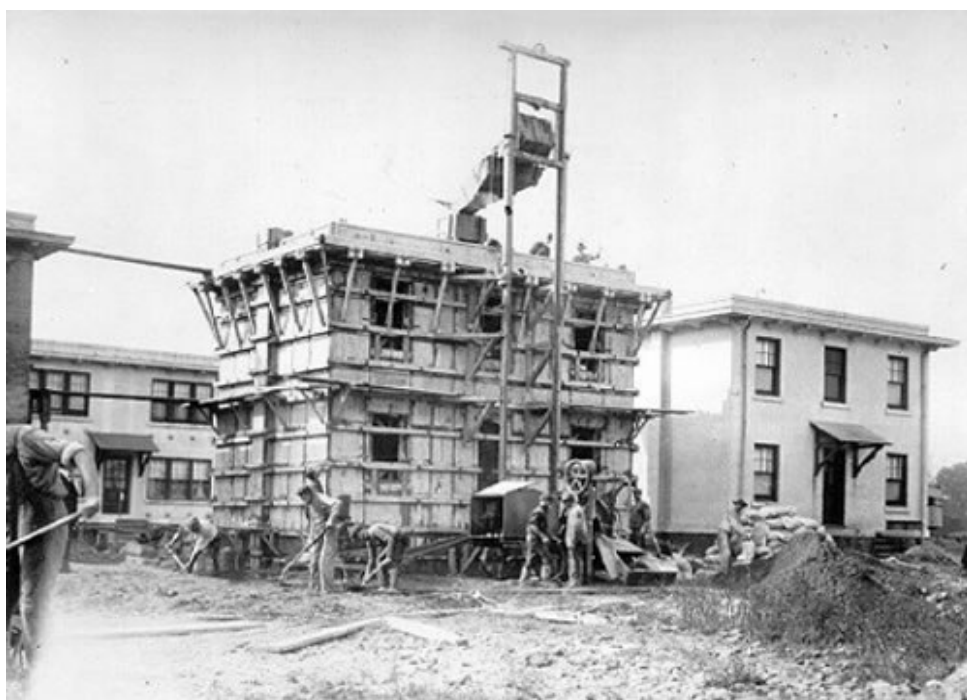


Fig.5 - Realizzazione di un edificio in calcestruzzo armato con la tecnica della colata unica sviluppata da Thomas Edison (1908) (Credits: © National Park Service, US Federal Government da commons.wikimedia)

1.3. "Better, faster, cheaper!": la produzione di massa negli Stati Uniti

Con queste premesse, la sperimentazione tecnologica arriva ai primi anni del Novecento, caratterizzati dal clima di forte fermento scientifico e socio-culturale innescato dalla Rivoluzione Industriale. In questi anni, si cominciarono ad introdurre nel campo dell'architettura concetti mutuati dai settori industriali; la centralità del progetto di architettura, inteso quale momento di concretizzazione della dimensione creativa del progettista, venne progressivamente messo da parte in favore di approcci che guardavano alla produzione edilizia, ovvero a logiche di fabbricazione seriale e assemblaggio di elementi prefiniti e standardizzati. L'impulso fondamentale in questa direzione si deve all'elaborazione, in questi stessi anni, del modello di produzione fordista, che si basava sulla catena di montaggio per aumentare la produttività della fabbricazione industriale (Fig.6). Dal 1913, l'imprenditore statunitense **Henry Ford (1863-1947)**, ispirandosi alle teorie di **Frederick Taylor (1856-1915)** sull'efficientamento della produzione industriale attraverso la scomposizione delle sequenze di assemblaggio, testò l'applicabilità della catena di montaggio "Model T" nel settore automobilistico, dando avvio alla produzione di massa di oggetti la cui produzione si basava fino ad allora su logiche di tipo artigianale. L'obiettivo dichiarato di Ford era quello di rendere accessibile ad ogni americano l'acquisto di un bene di massa quale l'auto, intento che fu perseguito attraverso la razionalizzazione dell'intera linea di produzione. In particolare, il modello fordista adottava il principio della standardizzazione, ovvero la limitazione della variabilità dei prodotti, quale strategia prioritaria per razionalizzare le risorse, diminuire gli scarti e attivare economie di scala, in modo da ridurre significativamente i costi di produzione e perciò di acquisto finale.

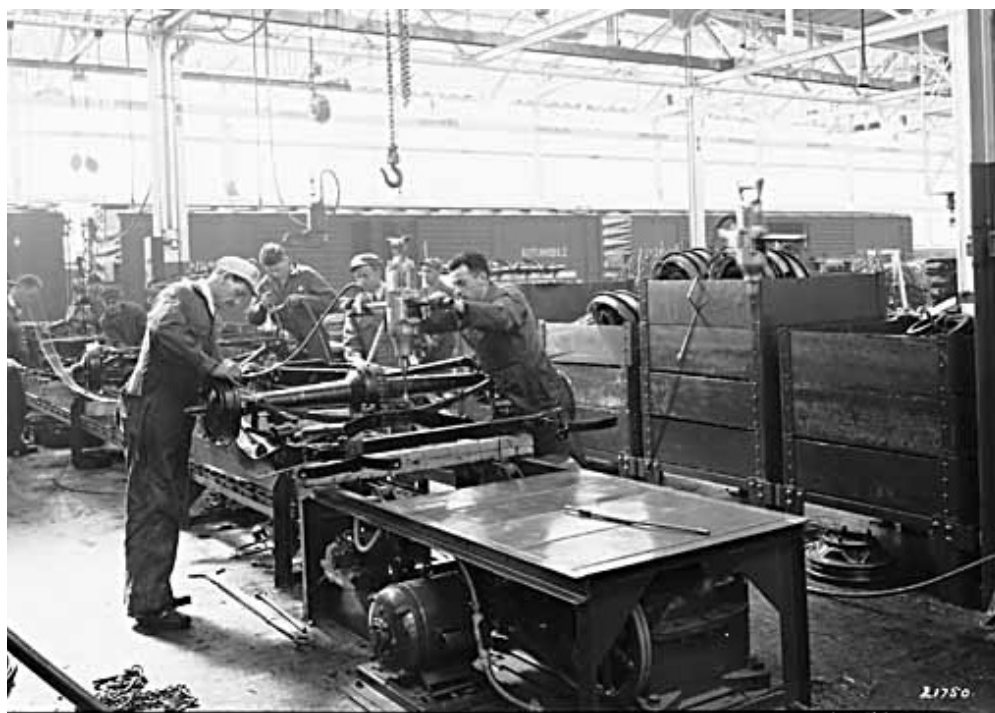


Fig.6 - Catena di montaggio nell'industria automobilistica Ford Motor Company, 1938 (Credits: Foto Leonard Juda Frank, Vancouver Public Library da commons.wikimedia)

Il modello fordista trovò ben presto applicazione anche nel contesto delle esperienze già avviate sul tema della prefabbricazione edilizia. Si cominciò infatti a pensare che l'architettura dovesse rinnovarsi dietro l'impulso delle nuove scoperte industriali per rispondere alle emergenti crisi abitative, considerando gli edifici e le abitazioni alla stregua di beni di consumo da produrre – all'interno di fabbriche – in lotti standardizzati, a basso costo, che poi potevano essere spediti e installati da parte degli stessi acquirenti. Negli Stati Uniti, cominciarono a proliferare realtà

imprenditoriali che offrivano la possibilità di realizzare il “sogno americano” della residenza, commercializzando “kit” di edifici residenziali unifamiliari ordinabili a partire da un catalogo di componenti standardizzati (*ready-cut*) (Knaack *et al.*, 2012). Il bisogno primario di possedere un’abitazione veniva anteposto a quello della loro personalizzazione, improntando i modelli di residenza a principi di uniformità del linguaggio architettonico. Un esempio in questa direzione è quello di **Aladin Homes (Readi-cut Aladin)**, azienda fondata dai fratelli Sovereign a Bay City (Michigan, USA) che per prima immise sul mercato un catalogo di elementi edilizi prefiniti in legno (montanti e travetti, pannelli di chiusura e finitura, pavimenti, ecc.), da ordinare per corrispondenza (Fig.7). Sulla base delle richieste, i componenti venivano preparati per la spedizione a partire da uno stock continuo di materiale, quindi inviati al cliente insieme alle istruzioni per il montaggio e il completamento dell’opera, che poteva avvenire in meno di un giorno. Accanto all’esperienza dei fratelli Sovereign, di altrettanto rilievo fu quella della compagnia Sears, Roebuck & co.; nata inizialmente come catena di grande distribuzione per corrispondenza, l’azienda si affacciò sul mercato della prefabbricazione in legno con il duplice obiettivo di rendere la proprietà immobiliare accessibile anche per la classe dei “colletti blu” e di facilitare l’acquisto di una casa al pari “di comperare una sedia o una lavastoviglie” (Arieff e Burkhart, 2002). Tra il 1908 e il 1940, si stimava che la compagnia avesse venduto circa 100.000 abitazioni a catalogo, venduti con un prezzo variabile tra 650 e 2.500\$.

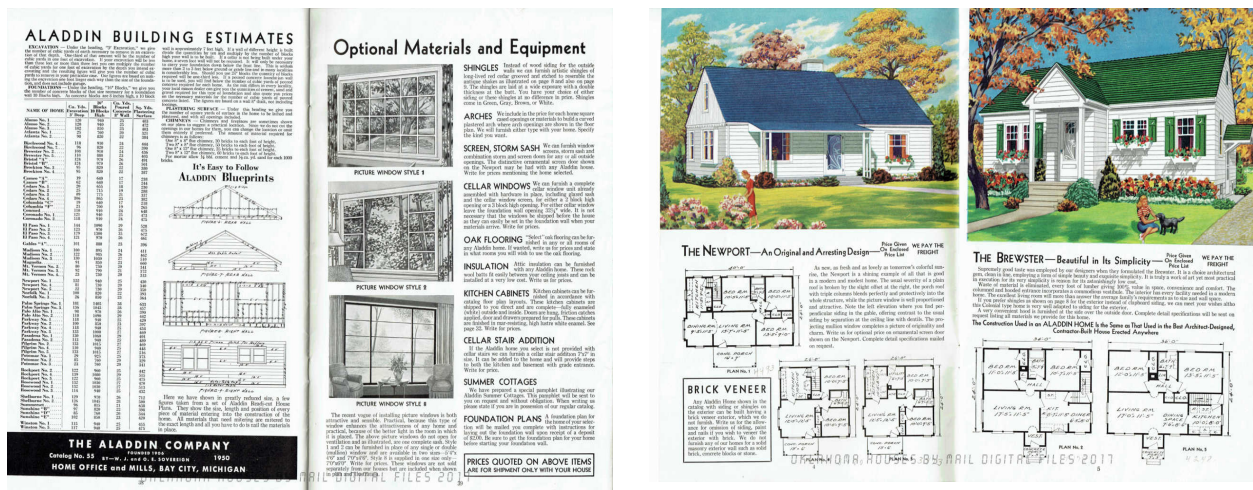


Fig.7 - Estratti da un catalogo delle abitazioni Aladin Readi-Cut Homes (1949-1950) (Credits: © Rachel Shoemaker Collection da Internet Archive: archive.org)

Un modello analogo fu implementato anche attraverso la prefabbricazione in acciaio. Il primo esempio risale addirittura al 1832, quando la società di Richard Walker cominciò ad esportare all’estero unità abitative prefabbricate che potevano essere acquistate a catalogo, consegnate e assemblate autonomamente dai clienti sulla base di istruzioni di montaggio che venivano fornite insieme al “kit” di componenti edilizi. Il vasto panorama di riferimenti prodotti a partire dai sistemi di prefabbricazione in acciaio fu oggetto di una mostra promossa nel 1933 alla Chicago World’s Fair nel 1933 nell’ambito della Century of Progress Exhibition. Tra i vari prototipi in mostra, si cita quello del costruttore **George Fred Keck, House of Tomorrow**, una unità abitativa a pianta dodecagonale, sviluppata su tre piani e costruita con una struttura in acciaio tamponata con pannelli in metallo e vetro, affiancata da un hangar in cui, in occasione della fiera, era stato sistemato un aereo militare Curtiss-Wright biposto (Arieff e Burkhart, 2002) (Fig.8). Nonostante non sia mai stato venduto, il prototipo è significativo di come il campo della prefabbricazione edilizia si avvicinasse in quegli anni a logiche di industrializzazione spinta, prendendo in prestito forme e materiali presi dal settore spa-

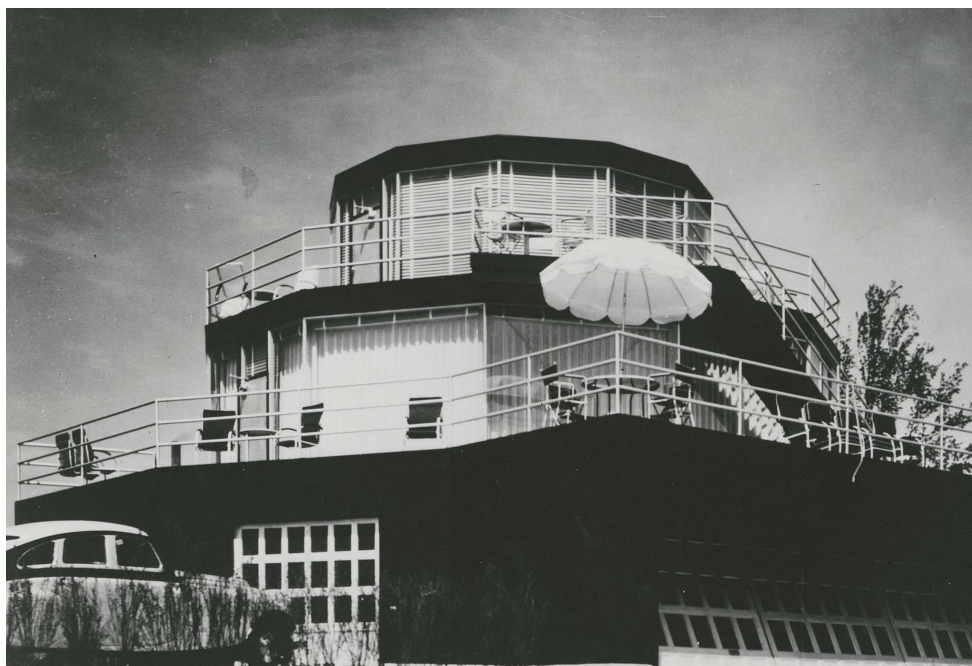


Fig.8 - House of Tomorrow per la Chicago World's Fair (George Fred Keck, 1933) (Credits: © Hedrich Blessing/Chicago History Museum da savingplaces.org)

ziale, a cui si guardava con entusiasmo in virtù del progresso e della dinamicità che evocava. Questo tipo di approccio alla produzione edilizia è testimoniato anche dalla produzione dei prototipi **American Motorhomes**, il cui nome già evocava la visione con cui si guardava al nuovo concetto dell'abitazione come macchina per abitare. Fondata da Robert MacLaughlin, l'azienda sviluppò la prima unità abitativa nel 1932 per il mercato delle case a basso costo. Le Motorhomes erano realizzate con una struttura portante in acciaio e prodotte secondo un catalogo di diverse aggregazioni standardizzate, che dovevano assecondare le diverse esigenze dei nuclei familiari. Il loro costruttore ne garantiva la "durabilità, bellezza, economicità e convenienza ad un livello che il mondo non ha ancora mai visto" (Arieff e Burkhart, 2002, p. 17). Nel caso delle Motorhomes, contrariamente all'approccio del "kit per l'auto-costruzione" MacLaughlin adottò il principio della casa quale "bene di consumo", offrendo un servizio chiavi in mano che prometteva addirittura di fornire l'abitazione "completa con il cibo in cucina!" (Arieff e Burkhart, 2002, p. 17).

Durante tutto il corso degli anni Trenta, gli Stati Uniti furono dunque il teatro di una intensa sperimentazione sul tema della produzione edilizia industrializzata, che interpretarono quale risposta alle emergenze abitative dell'epoca. In particolare, le esigenze di rapidità ed economicità di intervento furono risolte ricorrendo alla standardizzazione, ovvero uniformando la produzione e limitando la possibilità di personalizzazione delle soluzioni progettuali per razionalizzare la catena di montaggio. Tale spinta all'uniformità fu sostenuta anche da una intensa campagna politica della Farm Security Administration, che finanziò in molti Stati la realizzazione di prototipi e progetti dimostrativi per promuovere le potenzialità e i vantaggi della prefabbricazione "a catalogo" per l'edilizia residenziale. Tuttavia, tali soluzioni non riuscirono a suscitare l'interesse sperato. La società dell'epoca non era ancora pronta a fare proprio lo spirito della cultura di massa, e nell'immaginario collettivo l'abitazione rappresentava ancora un elemento identitario e di affermazione di una propria unicità. Tra il 1935 e il 1940, solo 10.000 abitazioni prefabbricate a catalogo furono realizzate, corrispondenti a meno dell'1% dell'intera produzione degli Stati Uniti (Arieff e Burkhart, 2002). Dopo pochi decenni dal loro avvio, le esperienze sul tema della prefabbricazione a catalogo subirono un ulteriore contrazione con l'avvento della Grande Depressione degli anni '30, che sancì l'epilogo di molte delle esperienze statunitensi avviate nei primi decenni del Novecento.

1.4. Il Movimento Moderno in Europa

Alle esperienze nordamericane si affiancarono contemporaneamente quelle dei grandi maestri del Movimento Moderno, che contribuirono ad influenzarne la cultura e il pensiero scientifico. Tra questi, **Le Corbusier (1887-1965)** per primo avviò una stagione di radicale cambiamento in Europa. Nel 1923, con la pubblicazione di *Verso un'Architettura* (1923), teorizzò il principio che la casa dovesse essere una “macchina per abitare”, prodotta in fabbrica alla stregua di beni di consumo quali l'automobile. Si inseriva in questa corrente il progetto per la Maison Citrohan (Fig.9), nome emblematico che richiamava direttamente la casa automobilistica, in cui si Le Corbusier condensò le teorie sull'industrializzazione edilizia formulando un nuovo linguaggio estetico, basato sull'esaltazione dei caratteri della standardizzazione e dell'uniformità come simbolo della massificazione della società del Novecento.



Fig.9 - Maison Citrohan a Stoccarda, Germania (Le Corbusier, 1927) (Credits: Foto Shaqspeare da commons.wikimedia (Creative Commons Licence))

Ispirato dalle teorie sulla “macchina per abitare” di Le Corbusier e grande estimatore del pensiero fordista, anche l'architetto tedesco **Walter Gropius (1883-1969)** contribuì attivamente al dibattito sul tema della prefabbricazione. Nel 1922 sviluppò il progetto della Copper House, un sistema abitativo basato sull'uso di pannelli prefabbricati con struttura metallica che, a seconda delle esigenze degli utilizzatori finali, poteva essere aggregato in varie configurazioni spaziali secondo la logica del “kit abitativo”. Negli anni successivi, Gropius sperimentò l'uso di elementi prefabbricati in acciaio anche in una serie di realizzazioni del Bauhaus², in particolare per progetti di edilizia residenziale in Germania, che rappresentavano le prime concrete applicazioni sul tema della industrializzazione edilizia in Europa. Il progetto fu presentato in occasione della mostra *Die Wohnung* del Deutsche Werkbund a Stoccarda nel 1927, insieme ad un repertorio di 17 unità abitative commissionate ai maestri

2. La scuola di arte, architettura e design da lui fondata a Dessau (Germania) nel 1919

del Movimento Moderno, tra cui Le Corbusier, Mies van der Rohe, Gropius e Peter Behrens, che intendevano raccogliere idee e spunti di riflessione sui principi della prefabbricazione industriale e della razionalizzazione del processo edilizio-costruttivo.

Dal 1942, Gropius avviò una collaborazione con **Conrad Wachsmann (1901-1980)**, architetto autodidatta formatosi come carpentiere e con uno spiccato interesse per la progettazione sistemica e la produzione meccanizzata dei componenti edili. Insieme elaborarono il progetto della **Packaged House**, una unità abitativa basata sul **sistema costruttivo General Panel**, commissionato dalla General Panel Corporation, composto da pannelli prefabbricati in legno, aggregabili attraverso un connettore a quattro direzioni brevettato dallo stesso Wachsmann (Imperiale, 2012) (Fig.10). L'idea alla base del progetto era quella di sviluppare "il sistema di prefabbricazione più completo, che potesse essere messo in opera da manodopera non specializzata e con minime competenze pregresse per realizzare edifici fino a due piani" (Staib *et al.*, 2007). Il sistema fu messo in produzione per la prima volta nel 1947 per servire il mercato dell'edilizia abitativa emergenziale post-bellica, con l'intento di offrire un sistema di rapida installazione di unità residenziali per le famiglie dei reduci della Seconda Guerra Mondiale. Tuttavia, la complessità del sistema tecnologico e di assemblaggio inibì la vasta diffusione della Packed House e, vista anche la forte concorrenza esterna, la produzione fu abbandonata dopo circa 150 esemplari prodotti. In questo senso, l'esperienza di Gropius e Wachsmann dimostrò come la fattibilità e applicabilità delle soluzioni progettuali non potesse prescindere dalla stretta collaborazione con le competenze tecniche e gli operatori del settore della produzione; in questo caso infatti, furono proprio l'autorialità e la mancata previsione delle modalità di fabbricazione a far lievitare i costi di produzione, precludendone l'acquisto agli stessi utenti a cui era destinato il sistema.

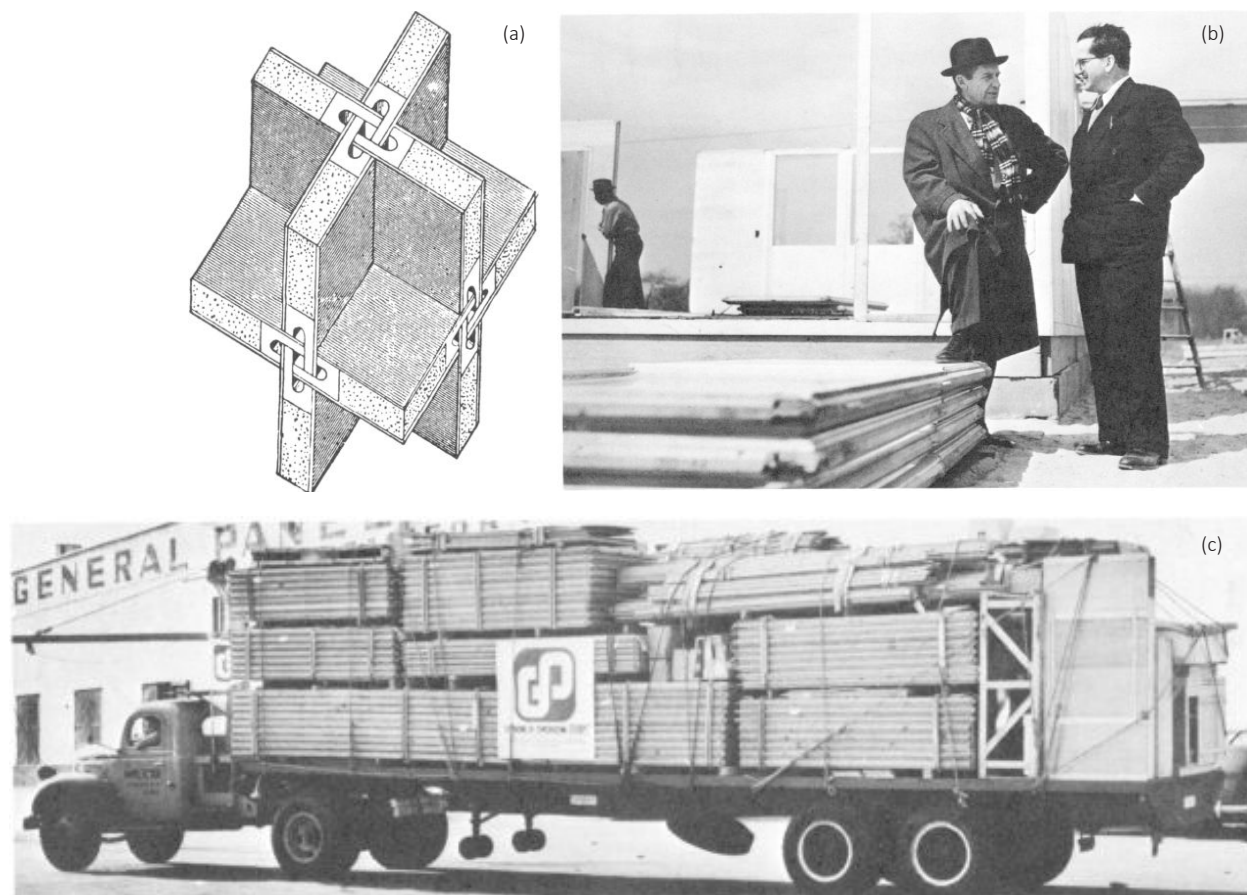


Fig.10 - Sistema General Panel: progetto del sistema di connessioni (a), trasporto (c) e montaggio in sito (b) (Gropius-Wachsmann, 1942) (Credits: © 1984, 2021 Massachusetts Institute of Technology (Creative Commons Licence) in Gilbert, H. (1984) *The Dream of the Factory Made House*. Walter Gropius and Konrad Wachsmann, The MIT Press Cambridge, Cambridge, Massachusetts- London, UK)

Negli stessi anni, sul tema edilizio emergenziale intervenne anche il contributo dell'architetto statunitense **Richard Buckminster Fuller (1895-1983)**. Nel 1929 presentò il progetto della **Dimaxion House** (Fig.11); la commessa arrivò quando G. Ray Schaeffer, manager del Marshall Field's Department Store gli chiese di progettare una abitazione che contenesse, esaltandoli, gli arredi prodotti dalla sua azienda. Inizialmente battezzata con il nome "4D", l'abitazione fu poi rinominata Dimaxion House da Waldo Warren che, dopo numerosi colloqui avuti con lo stesso Fuller, scelse un nome che conteneva in sé le parole preferite dall'ideatore per descrivere il progetto: "dinamismo", "massimo", "tensione". Il concept della Dimaxion House si basava su una unità abitativa a pianta esagonale, realizzata con un telaio in acciaio e pannelli di rivestimento in alluminio rivettati direttamente sulla struttura. Il progetto integrava oltretutto strategie passive per il controllo del comfort ambientale, ispirandosi alle forme delle tende mongole (per esempio la *jurta*) per favorire la ventilazione naturale ed evitare fenomeni di surriscaldamento interno. Inizialmente il progetto trovò applicazione nella **Dimaxion Deployment Unit (DDU)**, una unità abitativa da destinare agli insediamenti militari durante la Seconda Guerra Mondiale, che fu impiegata dagli americani nelle aree del Pacifico e del Golfo Persico (Fig.12). Negli anni il progetto fu progressivamente modificato fino alla forma del 1944, sviluppata nel primo prototipo della Dimaxion House, a cui si aggiunse il prototipo del **Dimaxion Bathroom**, una unità prefabbricata, realizzata secondo gli stessi principi della prima, in cui erano accentrata tutte le componenti di servizio e gli impianti (Fig.13). Il progetto fu realizzato a Wichita (Kansas, USA), passando alla storia con il nome omonimo – **Wichita House** – e dimostrò un interessante potenziale della prefabbricazione edilizia nella risposta alle esigenze della società statunitense dell'epoca.

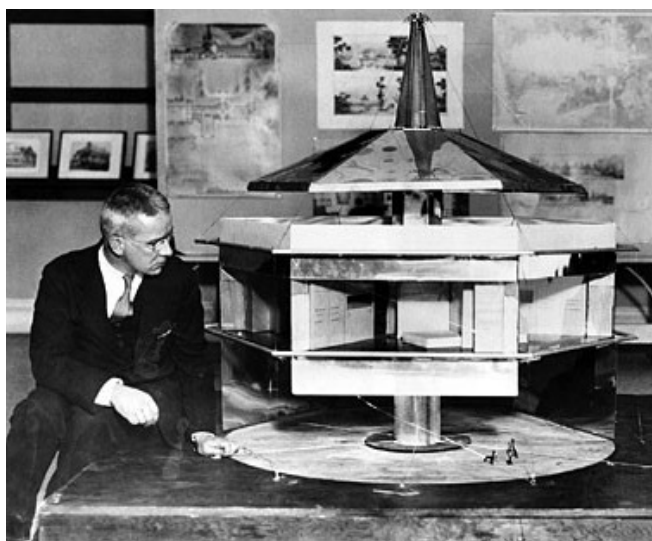


Fig.11 - Richard Buckminster Fuller accanto al modello della Dimaxion House (1929) (Credits: © Bettmann/Corbis via britannica.com)



Fig.12 - Dimaxion Deployment Unit (Richard Buckminster Fuller, 1940 ca) (Credits: Foto Daderot da Library of Congress: U.S. Farm Security Administration)

Il modello poteva essere disassemblato, trasportato con un unico mezzo e installato nuovamente in un giorno, e si caratterizzava per l'estrema leggerezza (pesava poco più di tre tonnellate, l'equivalente di una macchina, a fronte delle 150 di una abitazione tradizionale) e l'economicità. Il concept traeva ispirazione nelle tecniche di produzione del settore aerospaziale, trasferendone i principi progettuali – aerodinamicità, resistenza per forma, leggerezza – e i materiali al campo dell'architettura. L'abitazione doveva infatti essere messa in produzione dalla Beech Aircraft a Wichita e, con questa operazione, Fuller intendeva tra l'altro sostenere il processo di riconversione delle industrie aerospaziali che, terminata la Seconda Guerra Mondiale, avevano visto una forte contrazione della domanda. La Beech Aircraft mostrò interesse per il progetto come occasione di reimpiego della manodopera che, altrimenti, si sarebbe dispersa confluen-

do in altri settori di produzione. Il progetto riscosse molto successo fin da subito, e immediatamente l'azienda ricevette circa 3.500 ordini per la produzione. Tuttavia, fu lo stesso Fuller a frenarne la distribuzione sul mercato, asserendo che il progetto non era ancora sufficientemente maturo per la produzione su larga scala, e che sarebbero serviti ulteriori sette anni di ricerca per aumentarne la fattibilità. Inoltre, l'implementazione del progetto fu ulteriormente frenata dal governo a causa delle difficoltà di reperimento dell'alluminio e del costo eccessivo dell'unità abitativa (Arieff e Burkhart, 2002; Smith, 2010). Nuovamente quindi, anche l'esperienza di Fuller fu la testimonianza di come le emergenze dell'abitare, perciò le esigenze di rapida urbanizzazione, economicità e facilità di realizzazione degli edifici, non potessero essere soddisfatte se non attraverso lo stretto dialogo tra la fase di progetto e quella di realizzazione. L'industrializzazione dei componenti costruttivi richiedeva ai progettisti di ridefinire il proprio ruolo, avvicinandosi più a quello di un designer industriale, le cui scelte dovevano necessariamente assecondare i vincoli della produzione per assicurare la cantierabilità e concretizzazione delle loro proposte.

Un progettista che adottò invece un tale tipo di approccio fu **Albert Kahn (1869-1942)**, statunitense nato in Germania che ispirò le opere di molti maestri del Movimento Moderno. Tra gli anni Venti e Trenta del Novecento, Kahn divenne un riferimento per l'architettura industriale, lavorò su commessa di grandi industrie come quella di Henry Ford e per la General Motors (Fig.14), arrivando a progettare fino al 20% di tutte le fabbriche realizzate negli Stati Uniti in quell'epoca. L'approccio dello studio di Kahn è significativo per il condizionamento reciproco che si instaurava tra i tecnici responsabili dei progetti (architetti, ingegneri) e le aziende incaricate di produrre i componenti prefabbricati con cui venivano realizzate le opere, un dialogo che, a posteriori, sembra rappresentare proprio la strategia a cui si deve il successo e la vasta diffusione delle opere dello studio di Kahn. La commistione tra tecnici del progetto e settore industriale fu tale che anche nello stesso studio di architettura si attuarono logiche di "catena di montaggio" per la gestione dei progetti, un'organizzazione nella quale l'architetto assume il ruolo di dirigente e coordinatore di una "squadra" di tecnici altamente specializzati.

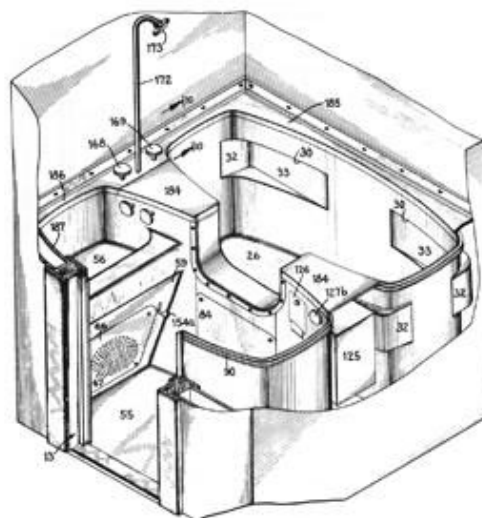


Fig.13 - Dimaxion Bathroom (Brevetto No. US.2.220.482, Richard Buckminster Fuller, 1944) (Credits: © 2022 Buckminster Fuller and The Dymaxion House da <https://blogs.uoregon.edu/dymaxionhouse/the-dymaxion-bathroom/>)



Fig.14 - General Motors Building, ora conosciuto come Cadillac Place (Albert Kahn, 1919) (Credits: United States Library of Congress's Prints and Photographs division da commons.wikimedia)

1.5. La prefabbricazione edilizia per la ricostruzione post-bellica

Contemporanee rispetto al Movimento Moderno, numerose esperienze sul tema della prefabbricazione furono sviluppate anche nell'ambito dei programmi di ricostruzione post-bellica in Europa. In Germania, l'emergenza abitativa fu affrontata attraverso la ricostruzione di grandi insediamenti attraverso tecniche di prefabbricazione pesante, ovvero ricorrendo alla produzione industrializzata in serie di componenti costruttivi in calcestruzzo (pilastri e travi, pannellature, ecc.). In questo contesto si sviluppano per esempio le prime opere con la tecnica Plattenbau, in particolare a partire dal **progetto pilota Berlin-Friedrichsfelde** avviato dal Capo della German Housing Provision (DEWOG) Martin Wagner nel 1924. Progetti, questo e quelli sviluppati in seguito, in cui tutti gli sforzi erano indirizzati alla sistematizzazione del sistema tecnologico-costruttivo, alla razionalizzazione dei componenti e delle sequenze di assemblaggio come mezzo per contenere i costi, lasciando minimi margini alla progettualità architettonica e alla variabilità compositiva e spaziale. I programmi avviati nel primo dopoguerra subirono un arresto a seguito della crisi economica degli anni Trenta, e si dovrà attendere la fine della Seconda Guerra Mondiale perché la prefabbricazione edilizia trovi una nuova possibilità di applicazione. La profonda crisi abitativa causata dal secondo conflitto diede infatti un nuovo impulso alla produzione di alloggi a basso costo, imponendosi in tutta Europa come l'unica tecnica costruttiva che, all'epoca, poteva rispondere alla necessità di rapidità ed economicità di realizzazione degli interventi di ricostruzione. In Francia, la prefabbricazione fu posta al centro della realizzazione dei cosiddetti *grand ensembles*, insediamenti a scala urbana il cui scopo era quello di offrire abitazioni a basso costo per le grandi masse di popolazione che si spostavano verso le città. Fu questa l'occasione per mettere a punto una serie di tecniche di prefabbricazione pesante a ciclo chiuso (come i sistemi Coignet e Balancy) che sfruttavano grandi lastre portanti in calcestruzzo per la realizzazione di edifici multipiano. Tali tecniche, in virtù della loro economicità e velocità realizzativa, furono successivamente esportate ed utilizzate per gran parte dei programmi di edilizia popolare in Italia, Inghilterra e URSS.

In Inghilterra, uno dei maggiori programmi promossi per l'emergenza abitativa post-bellica fu il **Temporary Housing Program (THP)**, nell'ambito del quale, tra il 1945-1949 furono realizzate 156.623 abitazioni prefabbricate per dare riparo alle famiglie sfollate. Secondo i critici, il programma fu la prima occasione in cui in Inghilterra furono introdotte e messe in pratica le teorie del Movimento Moderno, in particolare l'idea secondo cui una casa potesse essere prodotta dall'industria come un qualsiasi altro bene di consumo. La prefabbricazione fu interpretata dal THP come una logica sistemica, un approccio alla produzione e assemblaggio fuori opera di elementi standardizzati e prodotti in massa. In particolare, dopo una prima sperimentazione sulla tipologia di abitazione da sviluppare (che prese il nome di Portal Bungalow dall'allora Ministro del Lavoro Lord Portal), si arrivò alla definizione di quattro principali tipologie edilizie, tutte estremamente innovative per l'uso dei materiali e delle tecnologie: il modello Arcon, con struttura in acciaio e tamponamento



Fig.15 - Temporary Housing Programme nel Regno Unito: realizzazione di unità abitative post-belliche attraverso sistemi prefabbricati (1945-1949) (Credits: © Hulton Deutsch/Corbis/Getty/Keystone Features/Evening Standard da www.theguardian.com)

in pannelli di amianto, l'Uni-Seco e il Tarran, realizzati con un telaio in legno o calcestruzzo³ e pannelli di chiusura in amianto, e l'Alluminium, il cui nome richiamava l'uso di un materiale finora inedito in Inghilterra per le applicazioni edilizie (Fig.15). Inizialmente progettate per avere un ciclo di vita di circa 10-15 anni, le abitazioni realizzate dell'ambito del THP rimasero in uso ben oltre tale limite, e la gran parte fu negli anni riconvertita per funzioni sociali o come residenza estiva (Vale, 1995; Smith, 2010).

In Russia, le prime esperienze con l'uso dei sistemi prefabbricati erano state sviluppate contestualmente all'avvio del **Primo Piano Quinquennale di Stalin (1928)**, soprattutto rispetto a tecnologie leggere in legno, ma fu solo a metà degli anni Quaranta che si aprirono i grandi cantieri per la realizzazione di interventi di edilizia popolare. In questo contesto, nel 1953 sulla rivista *Arkitektura SSSR* un gruppo di architetti si esprime sostenendo che i principi dell'architettura tradizionale non potevano essere trasferiti al lessico della prefabbricazione, sollecitando l'abbandono di ogni forma di espressività progettuale in favore della standardizzazione architettonica e della razionalizzazione della produzione edilizia. La stessa corrente di pensiero fu ripresa dal capo dell'Unione Sovietica Nikita Chruščëv (1894-1971) nel suo programma operativo per fronteggiare l'emergenza abitativa post-bellica, che improntò all'uso di progetti-tipo, da replicare su vasta scala, per abbassare i costi delle opere e velocizzarne il completamento (Fig.15). La linea tenuta da Chruščëv fu talmente rigida da arrivare a rendere obbligatoria la realizzazione degli edifici sulla base dei progetti-tipo individuati, addirittura infliggendo sanzioni agli architetti che proponevano "eccessi architettonici" (Solopova, 2012).

3. La soluzione con struttura in calcestruzzo fu prevista a causa della scarsa disponibilità di legno dopo la Guerra.



Fig.16 - *Chruščëvka* (così denominati i quartieri realizzati durante il governatorato di Nikita Chruščëv) nel quartiere di Karoliniškės a Vilnius (Lituania) (Credits: Foto personale, 2016)

In Italia, lo sviluppo delle tecniche di prefabbricazione seguì un percorso diverso rispetto alle esperienze internazionali. Se in Europa e nel resto del mondo la prefabbricazione era stata impiegata come strumento essenziale per l'implementazione di programmi di edilizia residenziale e sociale, avviando contemporaneamente un processo di specializzazione produttiva su tali sistemi, in Italia negli anni Cinquanta se ne proibì addirittura l'uso, favorendo l'edificazione con tecniche tradizionali per assorbire il gran numero di manodopera non specializzata proveniente dalle campagne (Biagini, 2020). Fu solo dalla metà degli anni Sessanta che anche l'Italia iniziò a confrontarsi con il tema della prefabbricazione, settore attraverso cui si intendeva sviluppare l'industrializzazione necessaria a saturare l'urgente domanda di abitazioni nel periodo successivo alla Seconda Guerra Mondiale. Dopo un periodo iniziale di sperimentazione per testare l'applicabilità di diverse tecniche costruttive, l'**Istituto Autonomo Case Popolari (IACP)**, incaricato della gestione dei grandi programmi di edilizia pubblica, decise per l'importazione di sistemi di prefabbricazione che erano già in uso in Francia, ovvero una prefabbricazione pesante *a ciclo chiuso*, basata su concetti di serialità, standardizzazione e ripetizione modulare. In Italia come all'estero, proprio l'impostazione produttiva della serialità fu il motivo dell'insuccesso delle esperienze di questi anni sulla industrializzazione edilizia. Seppure la prefabbricazione avesse dato una risposta immediata al problema della casa, i grandi programmi di edilizia popolare erano ben lontani dall'assecondare le esigenze di rappresentatività, appropriazione e identità richieste invece dagli abitanti. A questo si aggiungeva la scarsa qualità costruttiva che connotava gli edifici, causata dalle poche risorse a disposizione e dalla rapidità con cui gli interventi dovevano essere realizzati. Il destino di molte delle realizzazioni di questi anni fu quello di diventare, in pochi anni, rappresentative di immagini di degrado, precarietà e insalubrità, determinandone il rifiuto da parte degli utenti e l'abbandono da parte dei progettisti.

Contestualmente alle esperienze europee, negli Stati Uniti il Presidente Truman diede avvio al **Veterans Emergency Housing Programme**, un programma di finanziamento che si poneva l'obiettivo di garantire una casa dignitosa

a tutti coloro che avevano partecipato alla guerra. Nel 1946, l'Housing Expediter Wilson Wyatt, su incarico di Truman, mise a punto un programma per la realizzazione di circa un milione di abitazioni in due anni. Come era già successo in precedenza, anche in questi anni la riscoperta della prefabbricazione fu sospinta dal declino dell'industria aerospaziale che, dopo un periodo di rapida espansione per la corsa agli armamenti durante la guerra, si trovava in una condizione di surplus produttivo che doveva essere riassorbito. Incoraggiate dai fondi messi a disposizione per i nuovi programmi di edilizia sociale, molte compagnie aerospaziali videro una opportunità nella riconversione della propria produzione per il settore edilizio. Tra queste, si possono citare gli esempi della **Vultex Aircraft**, che commissionò al designer americano Henry Dreyfus (1904-1972) il progetto per una abitazione da poter realizzare con elementi prefabbricati in acciaio, riconvertiti dalla produzione degli aerei, e quello della Lustron Corporation, che nel 1948 cominciò a produrre abitazioni standardizzate e a basso costo a partire dai mezzi utilizzati, durante la guerra, per la realizzazione degli aerei Curtiss-Wright (Arieff e Burkhart, 2002). Un caso analogo è quello della **Spartan Aircraft Company**, che si affacciò sul mercato proponendo una soluzione fino ad allora completamente inedita: si trattava infatti di una abitazione su ruote (*trailer*), realizzata per soddisfare le esigenze di una nuova società dinamica e in continuo spostamento (Fig.17). Costruiti a partire da lastre di alluminio piegate e rivettate su una sotto-struttura metallica, gli Spartan *trailer* fecero da apripista per sperimentare un nuovo modello di abitare, che conoscerà una vasta diffusione negli Stati Uniti negli anni Cinquanta. Il suo successo si deve all'efficacia nella risposta sia alle esigenze di adattabilità dello spazio, che a quelle di economicità di acquisto (un *trailer* costava circa \$5.000, equivalenti a circa 4400 €), che li rendevano accessibili a gran parte degli utenti senza dover ricorrere a prestiti e mutui bancari.

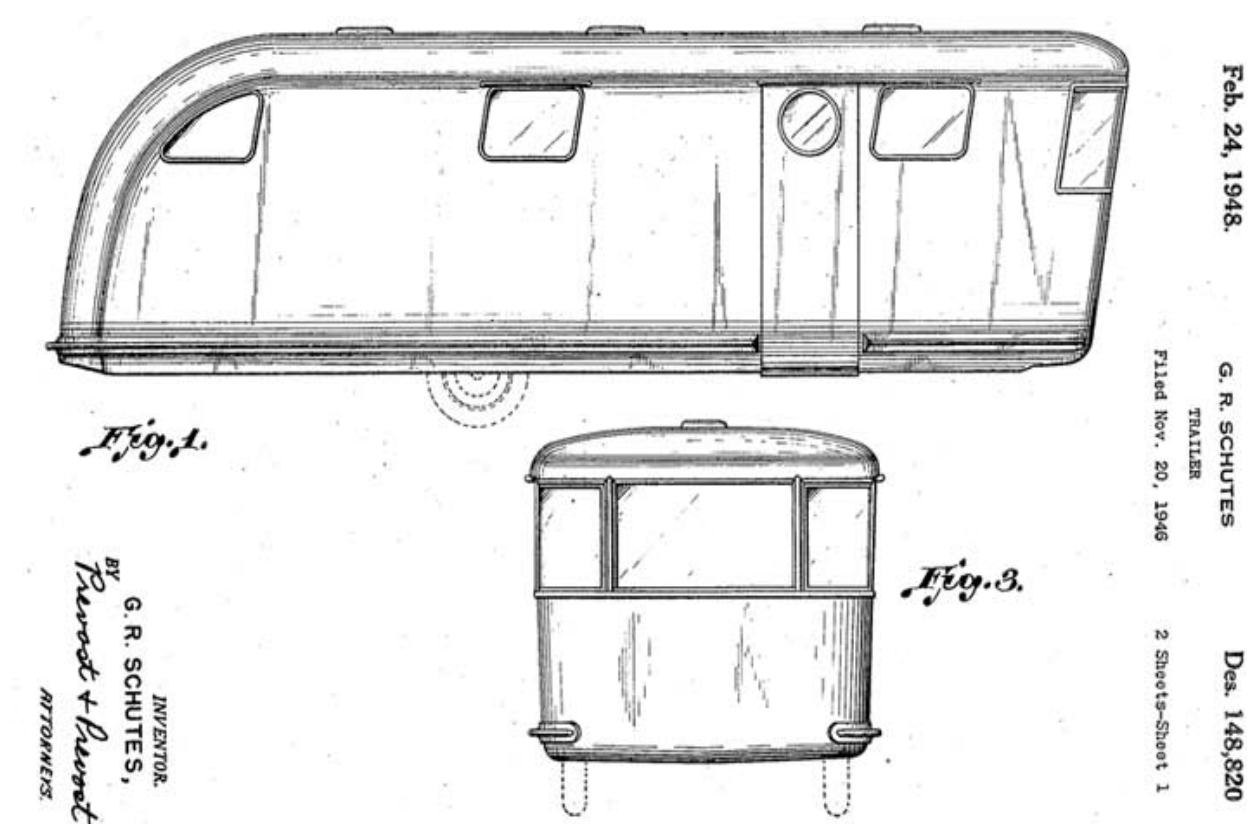


Fig.17 - Brevetto Spartan Trailer di G.R. Schutes (Nov. 20, 1946)

(Credits: © G.R. Schutes da Spartan Aircraft Company Trailers: www.spartantrailer.com/schultz.html)

A partire dagli anni Quaranta, un'esperienza di rilievo, seppur diversa da quelle citate, sul tema della industrializzazione edilizia fu quella sviluppata da **William Levitt (1907-1994)**, uno dei pionieri del settore delle costruzioni del secondo dopoguerra. Piuttosto che sulla prefabbricazione come produzione in officina dei componenti edilizi, Levitt si concentrò infatti sulla razionalizzazione del processo di assemblaggio in opera, trasferendo di fatto il concetto di industrializzazione della produzione allo stesso sito di installazione. Al fine di ottimizzare gli sforzi necessari alla costruzione, la strategia commerciale di Levitt si focalizzò sulla realizzazione di interi programmi di edilizia residenziale, intensificando la produzione in un singolo luogo di intervento per abbattere i costi delle abitazioni. Nel 1945 le teorie di Levitt furono per la prima volta messe in pratica nel progetto di **Levittown (Pennsylvania, USA)**, in cui si arrivarono a realizzare fino a 150 abitazioni a settimana; una estremizzazione dei concetti di industrializzazione che integrava e trasferiva in modo diretto i principi del fordismo e della catena di montaggio al campo edilizio, e che servì come standard di riferimento per tutte le esperienze sviluppate successivamente (Arieff e Burkhart, 2002; Smith, 2010) (Figg.18,19).



Fig.18 - Vista aerea della città di Levittown, Pennsylvania (William Levitt, 1945)
(Credits: commons.wikimedia)



Fig.19 - Volantino del 1950 che pubblicizzava il modello di abitazione Ranch Models prodotto dalla compagnia Levitt
(Credits: Levittown History Collection, Levittown Public Library da New York Heritage Digital Collection)

1.6. Verso l'industrializzazione flessibile

Le tecnologie di prefabbricazione e industrializzazione della produzione edilizia furono impiegate anche negli anni del secondo dopoguerra per rispondere all'urgenza di ricostruzione dei tessuti urbani distrutti. Tuttavia, il rifiuto verso i modelli architettonici uniformi e ripetitivi, già sperimentati nel primo dopoguerra, generò negli architetti la volontà di esplorare archetipi costruttivi diversi, che abbandonavano il linguaggio della ripetizione seriale e della produzione pesante in favore di una maggiore flessibilità compositiva, che rispondeva alle esigenze della collettività.

In questo clima di esplorazione di nuovi approcci alla prefabbricazione, nel 1945 fu avviato il **Case Study Houses**, un programma di edilizia residenziale promosso da John Entenza, editore della rivista Arts & Architecture in California (USA) che intendeva definire modelli innovativi e altamente qualitativi di unità residenziali da realizzare mediante l'uso di tecnologie prefabbricate (Fig.20). La principale novità del programma consisteva nella partecipazione dei più noti architetti dell'epoca, tra cui Richard Neutra, Charles e Ray Eames, Eero Saarinen e Raphael Soriano. Il loro coinvolgimento aveva lo scopo di ridefinire i contenuti architettonico-formali dell'edilizia prefabbricata, in modo da promuoverla e suscitare nuovo interesse da parte del pubblico statunitense che – rifiutati i modelli di standardizzazione di massa proposti nei decenni precedenti – si era allontanato da queste tecniche, facendone crollare la domanda sul mercato. Il Case Study Houses ebbe una durata di circa 20 anni, fino al 1966, durante i quali furono realizzate circa 36 residenze. Il programma non portò però ai risultati sperati, per le stesse cause che avevano causato la fine delle esperienze dei primi anni del Novecento. Gran parte degli architetti elaborò autonomamente il progetto, senza coinvolgere le aziende che si sarebbero dovute occupare poi della produzione. Si arrivò quindi a progettare sistemi tecnologici altamente complessi, i cui costi di produzione superavano nettamente i budget inizialmente stimati, con la conseguenza che il programma non riuscì mai a raggiungere gli obiettivi prefissati per la commercializzazione su vasta scala (Knaack *et al.*, 2012; Smith, 2010).



Fig.20 - Case Study House 22, Los Angeles, California, USA (Pierre Koenig, 1960)
(Credits: Flickr (Creative Commons Licence)
da www.archdaily.com)

Ciononostante, il Case Study Houses risultava sintomatico dell'emergere di una corrente di rinnovamento per il tema della produzione edilizia. Reagendo ai limiti che avevano contraddistinto le esperienze precedenti, in questi anni si cominciarono infatti a promuovere delle logiche di industrializzazione maggiormente flessibili, in cui la rigidità della standardizzazione cedeva il passo alle possibilità, da parte dell'utenza e dei progettisti, di definire le opzioni di

personalizzazione dei prodotti e delle configurazioni architettonico-spaziali degli edifici. Nel panorama della produzione edilizia *off-site* cominciarono ad affacciarsi aziende che offrivano soluzioni edilizie sì prefabbricate, ma che al tempo stesso si dimostravano personalizzabili e adattabili secondo le volontà dei committenti. Uno dei primi passi in questa direzione fu quello della azienda statunitense Eichler Homes Inc., che nel 1949 incaricò un designer di progettare un modello componibile di unità prefabbricata in grado di coniugare la rapidità, la semplicità di esecuzione e l'economicità con le possibilità compositive ed espressive del progetto. L'intento era quello di formulare una proposta sul mercato che fosse al tempo stesso competitiva rispetto all'uso di tecniche di costruzione tradizionali ma anche attrattiva per le grandi masse, proprio perché ciascun cliente poteva avere la libertà di "comporre" e configurare la propria abitazione secondo esigenze e preferenze stilistiche diversificate. Rispetto allo stato dell'arte dell'epoca, l'innovazione di approccio portata avanti da Eichler Homes Inc. segnò un precedente per ridefinire gli standard di riferimento per l'edilizia prefabbricata, rispetto a cui le altre imprese, anche successivamente, dovettero allinearsi per rimanere competitive sul mercato (Arieff e Burkhart, 2002).

In Australia, un caso esemplare di questa corrente di rinnovamento fu il lavoro di **Harry Seidler (1923-2006)**, allievo di Walter Gropius ad Harvard, e in particolare un progetto elaborato nel 1954 su commissione del Royal Australian Institute of Architects (RAIA) (Fig.21). Reinterpretando il linguaggio modernista del suo mentore, Seidler sviluppò il progetto per un sistema tecnologico che aveva come obiettivo dichiarato "il contrasto alla monotonia della prefabbricazione". Come quella precedente, anche l'esperienza di Seidler si inserì nel percorso di sperimentazione sui temi dell'adattabilità e flessibilità della produzione edilizia industrializzata. Secondo lo stesso Seidler infatti, la rigidità e la serialità con



Fig.21 - Rose Seidler House
(Harry Seidler, 1950)
(Credits: © Marcell Seidler
PD da Casabellaweb.eu)

cui si producevano i componenti – e con cui venivano concepiti i progetti – erano i maggiori limiti alla diffusione delle tecnologie di prefabbricazione. Il percorso intrapreso dal RAI A insieme a Seidler andava invece nella direzione di attribuire un'identità progettuale anche alle soluzioni edilizie industrializzate, ritenendo che fosse l'unico modo per farle accettare alla collettività (Arieff e Burkhart, 2002). Anche per questo motivo, il primo – e unico – prototipo dell'unità abitativa commissionata a Seidler, in mostra alla Sydney Town Hall nel 1954, faceva largo uso di materiali naturali e risorse locali, più familiari e conosciute rispetto per esempio all'acciaio, all'alluminio o al calcestruzzo.

In Europa, lo stesso percorso di ricerca sull'adattabilità della prefabbricazione fu intrapreso dal francese **Jean Prouvé (1901-1984)** con le Demountable Houses (Fig.22). Incaricato nel 1950 dal Governo di progettare un modello di unità abitativa da produrre in massa per l'emergenza abitativa del secondo dopoguerra, Prouvé propose una soluzione che superasse i limiti della produzione seriale in favore di un modello costruttivo ad elevata flessibilità e personalizzazione. Concretamente, il progetto di Prouvé si basava sull'uso di un sistema di componenti strutturali in acciaio (travi, pilastri) che potevano essere liberamente assemblati sulla base di regole di coordinazione modulare. A partire dai componenti e sulla base delle "istruzioni di assemblaggio", Prouvé arrivò a determinare quattordici schemi tipologici, che potevano ulteriormente essere modificati e implementati seconda delle richieste degli abitanti. Tuttavia, la versatilità del sistema spaziale-aggregativo portava con sé una elevata complessità della soluzione tecnologico-costruttiva; i costi per la produzione dei componenti aumentarono talmente tanto da superare il budget messo a disposizione dal Governo, con la conseguenza che le poche realizzazioni fatte con il sistema di Prouvé furono ad appannaggio di committenti benestanti, piuttosto che dei ceti minori per i quali erano state commissionate (Arieff e Burkhart, 2002).



Fig.22 - Ricostruzione della Demountable House 6x6 (Jean Prouvé, progetto originale del 1944) (Credits: © Galerie Patrick Seguin da www.dwell.com)

Contemporaneo al clima di rifiuto della massificazione, gli anni Cinquanta furono anche teatro di una serie di cambiamenti economici e culturali che modificarono profondamente gli assetti demografici e gli stili di vita della società. Si configurarono stili di vita maggiormente dinamici e continuamente in movimento, per i quali era preponderante la necessità di possedere un'abitazione rispetto al suo valore architettonico. In questo contesto, la risposta arrivò dal settore della produzione nella forma di un nuovo modello di abitazione prefabbricata: la **mobile home** (Fig.23). Prodotta per la prima volta nel 1936 da William Bushnell Stout sulla scorta del precitato modello trailer della Spartan Aircraft Company, la *mobile home* era una vera e propria "abitazione su ruote", un *trailer* prefabbricato integrato con servizi e arredi, che offriva la possibilità di "conciliare radicamento domestico e nomadismo esistenziale" (Zanelli, 2006, p. 8), rispondendo alle peculiari esigenze della società degli anni '50-60: flessibilità, adattabilità, dinamismo socio-economico, accessibilità per le fasce più deboli. Il successo di questa nuova forma di abitare fu tale che, nel 1960, si stimava che le *mobile homes* costituissero il 15% dell'intero mercato immobiliare statunitense, arrivando a coprire nel 1968 un quarto delle proprietà monofamiliari (AA.VV., 1976; Arieff e Burkhart, 2002).

UNIVERSAL *a famous name in mobile homes for over 22 years*

SECOND TO NONE

INTRODUCES THE
UNIVERSAL FUTURISTIC MODEL 55
At an unbelievable low price!

A value only the ultra-modern Terra Cruiser production line can deliver.

Famous Terra Cruiser Construction
• Full deluxe bath • Step-saving kitchen with 12 cu. ft. refrigerator • Spacious living room • Separate dinette area

Like all mobile homes built by Terra Cruiser the Universal Futuristic Model 55 is designed for a lifetime of trouble free service

TERRA CRUISER TRAILER COACH CO.
9250 E. Washburn Crossing Road • Downey, California

Write for free literature and name of nearest dealer.

Mobile & Manufactured Home Living mobilehomeliving.org TRAILER LIFE

Fig.23 - Volantino pubblicitario di un modello di *mobile home* (Modello Universal by Terra Cruiser Trailer Coach Company) (Credits: Mobile and Manufactured Home Living da mobilehomeliving.org)

1.7. La corrente del Radicalismo e il movimento *high-tech*

A partire dalle esperienze degli anni '50, la seconda metà del secolo si aprì con l'affermazione di una corrente di radicalismo che era meno interessata ad approfondire le questioni tecnico-operative connesse con la prefabbricazione dell'edilizia per le grandi masse. Piuttosto, la tendenza era quella di esasperare il linguaggio e l'approccio all'industrializzazione come mezzo per trasmettere un messaggio di radicale cambiamento all'interno della società. Erano gli anni della corsa alla Luna, e il fermento scientifico intorno alle possibilità delle nuove tecnologie e materiali ispirò un'intera generazione di architetti interessati a prefigurarne le ricadute anche nel settore delle costruzioni. I maggiori esponenti di questa corrente furono il gruppo inglese degli **Archigram**, che annoverava tra i suoi massimi esponenti **Richard Rogers (1933-2021)**, **Norman Foster (1935)**, **Peter Cook (1936)** e **Ron Herron (1930-1994)**. Proprio a quest'ultimo si deve l'immagine utopistica della prima delle *Walking Cities*⁴, visioni di città fantastiche per un futuro distopico in cui l'uomo sarebbe stato costretto a spostarsi continuamente alla ricerca di fonti di sopravvivenza. Scenari che furono successivamente interpretati da una serie di proposte progettuali, tra cui la *Zip-up House* che Rogers elaborò nel 1968: un modello di unità abitativa realizzata con pannelli coibentati in alluminio, che poteva essere assemblata in due settimane, smontata e trasferita in un altro sito a seconda delle necessità, con ridotti costi di produzione e di manutenzione. Sempre a Rogers si deve successivamente il progetto della **Autonomous House (Zip-up House)**, un ecosistema artificiale in grado di riciclare acqua e rifiuti, che sfruttava le fonti di raffrescamento e riscaldamento passivo per controllare le condizioni ambientali interne, ed era addirittura in grado di produrre l'energia necessaria al suo funzionamento (Arieff e Burkhart, 2002) (Fig.24).

4. Anche conosciute come "instant cities" o "plug-in cities"

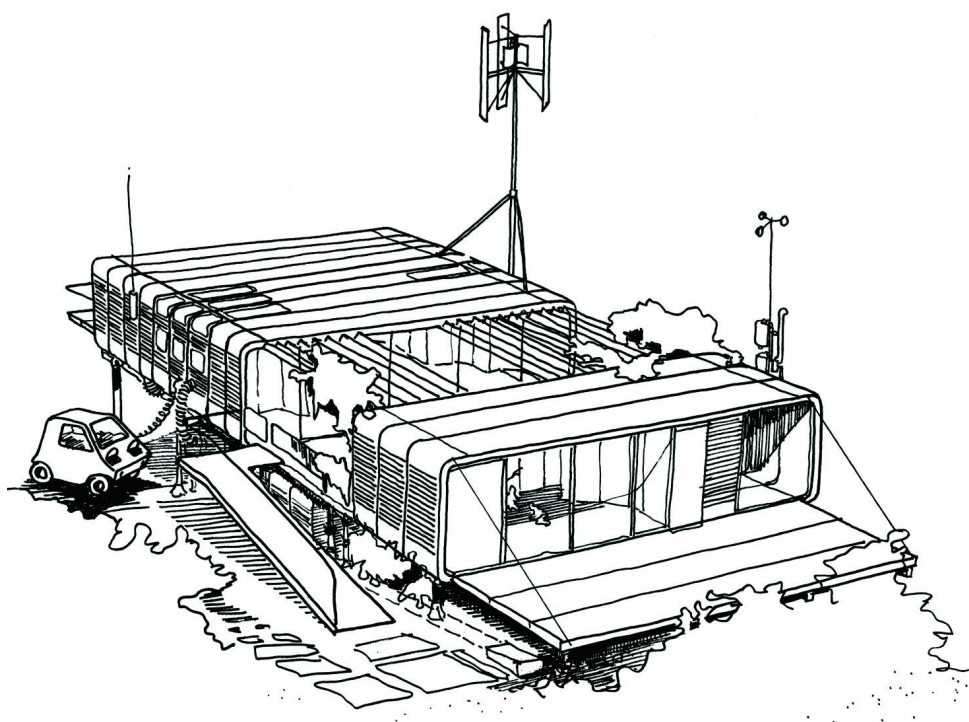


Fig.24 - Concept della Zip-Up House (Richard Rogers, 1968) (Credits: Rogers Stirk Harbour + Partners. Image © Richard and Su Rogers da www.archdaily.com)

Seppure nessuno di questi progetti fu mai effettivamente realizzato, il manifesto degli Archigram servì ad influenzare un'intera generazione di giovani architetti negli Stati Uniti e in Giappone. Per esempio **Moshe Safdie (1938)**, che all'Esposizione Universale di Montreal del 1967 presentò Habitat 67, un progetto di insediamento urbano ad alta densità che comprendeva 158 residenze realizzate con 354 unità modulari prefabbricate in calcestruzzo, sfalsate in altezza per garantire a tutti uno spazio aperto di pertinenza (Fig.25). Il progetto suscitò l'interesse della comunità scientifica e del pubblico, ma la scarsa maturità della soluzione tecnologica comportò una serie di problematiche – peso eccessivo delle unità, costi elevati per la modifica delle casseforme – tali da portare lo stesso architetto a definire una tale operazione “impossibile da mettere in pratica nella pratica corrente” (Arieff e Burkhart, 2002; Smith, 2010, p. 35).

In Giappone, un caso analogo fu quello della **Nakagin Capsule Tower (1970)**. Progettata dall'architetto metabolista **Kisho Kurokawa (1934-2007)**, che vi trasferì i concetti propri dell'architettura plug-in, la torre era realizzata a partire da celle prefabbricate in calcestruzzo (rinominate “capsule” da Warren Chalk degli Archigram), corrispondenti ciascuna ad una minima unità abitativa, che si innestavano su un corpo centrale di distribuzione (Fig.26). L'idea alla base del progetto era quella di un sistema incrementale, che potesse evolvere attraverso l'aggiunta o la disinstallazione di celle per assecondare le esigenze di uso da parte degli abitanti. Nonostante gli intenti però, i costi elevati necessari per le integrazioni hanno nel tempo scoraggiato modifiche successive e, ad oggi, nessuna cella è stata mai aggiunta e/o rimossa dalla torre (Smith, 2010).



Fig.25 - Vista aerea dell'insediamento Habitat 67, Montréal, Canada (Moshe Safdie, 1968)
(Credits: © Studio Graetz da www.abitare.it)



Fig.26 - Nakagin Capsule Tower, Tokyo, Kanto, Giappone (Kisho Kurokawa, 1970)
(Credits: Foto Kakidai da [commons.wikimedia](https://commons.wikimedia.org/) (Creative Commons Licence))

1.8. La seconda metà del Ventesimo secolo

In Italia, la seconda metà del Novecento fu invece caratterizzata dallo stesso percorso di ricerca che era già stato intrapreso negli anni Quaranta in USA e Australia per superare i limiti che avevano scoraggiato l'uso della prefabbricazione dopo le realizzazioni del secondo dopoguerra, in particolare rispetto all'adattabilità della produzione industriale. La logica che si intendeva superare era quella della prefabbricazione a ciclo chiuso, vale a dire un'industrializzazione di massa finalizzata alla riproduzione seriale di progetti-tipo. Si iniziò dunque ad avvicinare una prefabbricazione aperta (o prefabbricazione a ciclo/sistema aperto), ovvero una modalità di produzione industriale che alle realizzazioni "a catalogo" affiancava quelle su commessa specifica del progetto. La riorganizzazione del processo secondo questa concezione permetteva di allontanarsi dalle logiche di costruzione standardizzate "chiavi in mano", in favore della produzione di componenti edilizi variabili e coordinabili sulla base di moduli dimensionali unificati secondo un approccio di modularizzazione del progetto architettonico-spaziale e tecnologico.

Abilitare questa nuova impostazione industriale richiedeva però un sostanziale ripensamento del ruolo del progetto; occorre riaffermarne la centralità come momento creativo rispetto a cui l'industrializzazione doveva essere un mezzo strumentale a servizio delle esigenze del programma edilizio e degli utenti, piuttosto che un imperativo a cui sottomettere gli sforzi progettuali. In questo scenario, un essenziale contributo di innovazione, sia metodologica che filologica, fu quello della cosiddetta "scuola fiorentina" che ebbe tra i suoi protagonisti **Giovanni Klaus Koenig (1924-1989)**, **Pierluigi Spadolini (1922-2000)**, **Pier Angelo Cetica e Raffaello Fagnoni (1901-1966)**. Con le loro esperienze di ricerca e progettuali, sviluppate nel contesto disciplinare della cattedra di Progettazione artistica per le industrie e della Scuola di Tecnologia dell'Architettura e Design dell'Università di Firenze, si fecero promotori di un nuovo lessico di riferimento per l'architettura industrializzata, generato dalla commistione e dalla contaminazione tra i metodi propri del design industriale, della tecnologia e della composizione architettonica. Il loro lavoro e quello dei loro allievi permisero di ridefinire la posizione del progetto di architettura rispetto alla necessità-volontà di industrializzare la produzione edilizia. Il principio teorico che fu portato avanti fu quello che processo edilizio dovesse svilupparsi a partire dalla formulazione di un programma costruttivo pragmatico, orientato alla fabbricazione e sviluppato in sinergia con il contesto produttivo esistente, basato sul presupposto della componibilità come soluzione per rendere la prefabbricazione compatibile con le esigenze del progetto. A questo proposito, emblematica è la definizione che Spadolini dava della prefabbricazione, ovvero come "un programma di possibili accostamenti ed unioni di pezzi, che richiedeva alla progettazione un approccio integrale, indispensabile al procedimento industriale" (Spadolini, 1966, p.307, in Biagini, 2020, p. 99). In questo si può leggere l'anticipazione dell'attuale approccio di riferimento per la progettazione orientata alla prefabbricazione, il cosiddetto Design for Manufacture and Assembly (DfMA). Una progettazione che parte dall'analisi dei vincoli e delle opzioni tecnico-progettuali rese possibili dai produttori e che trova nelle logiche di fabbricazione *off-site* gli input e la chiave di lettura per approntare decisioni progettuali coerenti con gli obiettivi di produzione, di razionalizzazione delle sequenze di realizzazione e di adattabilità e customizzazione dei prodotti industriali. Uno dei progetti emblematici di questo periodo, sviluppato proprio nel contesto di sperimentazione sulle architetture per l'emergenza, è quello del Sistema Abitativo di Pronto Impiego (SAPI) di Pierluigi Spadolini, un modulo abitativo per condizioni transitorie realizzato con una struttura in metallo e chiusure in lastre di resina rinforzate con fibra di vetro, configurabile secondo *layout* e aggregazioni variabili, per rispondere all'eterogeneità delle condizioni di uso (Gurrieri, 1988) (Fig.27).

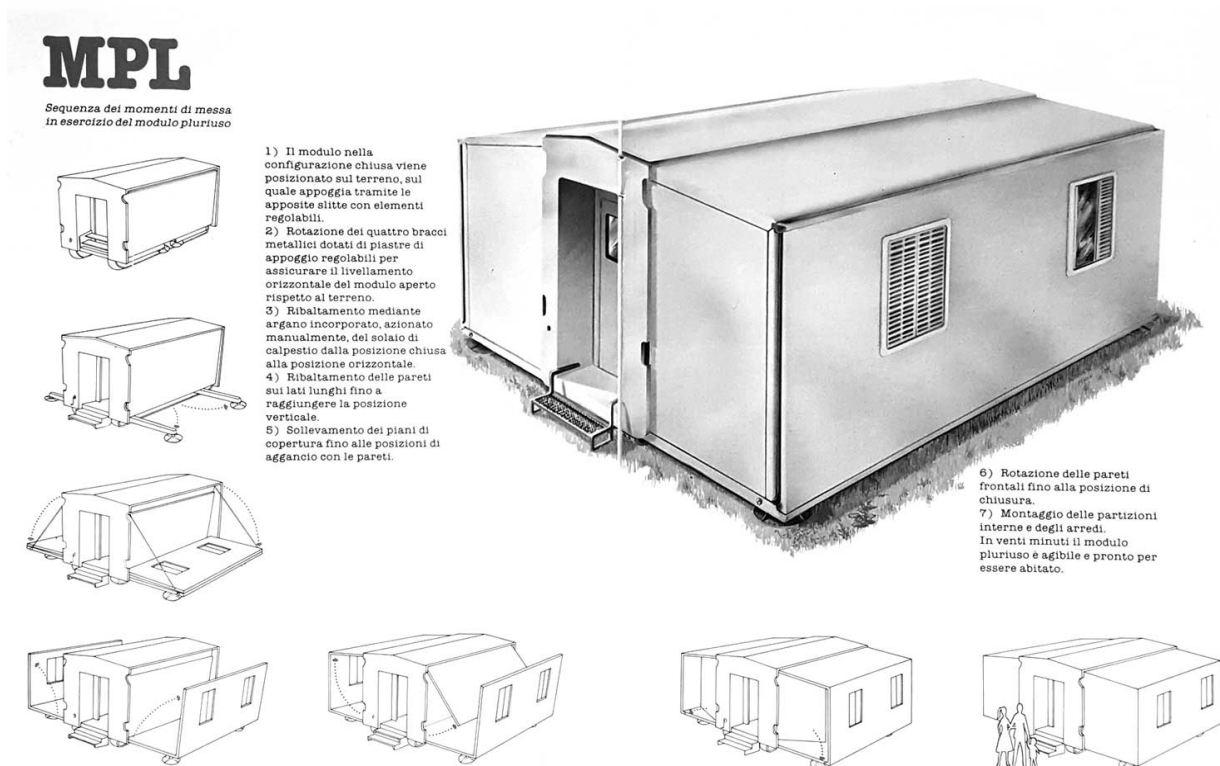


Fig.27 - Progetto SAPI (Pierluigi Spadolini per IRI-Italstat con Edilpro)
(Credits: © Pierluigi Spadolini da OAR Ordine degli Architetti di Roma: www.architettriroma.it)

1.9. Lesson learned⁵

La storia della prefabbricazione, fino agli anni Ottanta del Novecento, rappresenta un percorso di evoluzione in cui si alternano successi e fallimenti. Nonostante le intrinseche potenzialità della fabbricazione *off-site*, l'effettiva applicabilità delle logiche industriali alla produzione edilizia si è dovuta scontare con una serie di limiti produttivi e progettuali che, nel tempo, non solo ne hanno precluso la diffusione su vasta scala, ma ne hanno anche comportato il rifiuto da parte degli utenti e dei professionisti. Il limite maggiore, che accompagna tutte le diverse esperienze svolte sul tema della prefabbricazione dall'Ottocento ad oggi, è l'impostazione produttiva orientata alla serialità e standardizzazione di massa, ovvero ad un'offerta estremamente limitata di prodotti che non si è rivelata appropriata a supportare le complesse esigenze del progetto. Storicamente infatti, le uniche esperienze che sono riuscite a proporsi come alternativa alle tecniche tradizionali sono quelle di prefabbricazione per sistemi aperti, che hanno mirato a "standardizzare e produrre in massa non case intere, ma solo i loro componenti" (Gropius, 2010 (1943), Cit. in D'Emilio, 2016, p. 96), lasciando margini di adattabilità delle soluzioni architettonico-progettuali. Il tema della flessibilità della produzione deve anche leggersi come conseguenza dell'autorialità delle proposte sviluppate. In molti dei casi analizzati, la causa di fallimento si è dimostrata infatti essere nella mancata previsione delle modalità con cui i componenti edilizi sarebbero stati prodotti industrialmente, generando aumenti dei costi insostenibili in fase di ingegnerizzazione e di successiva immissione dei prodotti sul mercato. La lezione che ne perviene è che il progetto per la prefabbricazione non può prescindere dall'adozione di principi e approcci mutuati dalla progettazione industriale, attivando processi di sinergica collaborazione con gli operatori dei settori di produzione per stabilire reciprocamente i parametri di fattibilità e i limiti di accettabilità delle soluzioni progettuali. Lo scambio continuo tra la fase di progetto e quella di produzione, che si

riflette inevitabilmente nel dialogo tra architetto/designer e azienda, rappresenta infatti un elemento essenziale a garantire la fattibilità tecnico-economica delle innovazioni. Negli ultimi anni, questa necessità di coinvolgimento e integrazione è stata approntata attraverso il cosiddetto “Integrated Project Delivery” (IPD), una metodologia di sviluppo delle opere che richiama la partecipazione attiva di tutti gli *stakeholders* (utenti, committenti, fornitori, consulenti) in tutte le fasi del processo di progettazione, realizzazione e uso dei beni, al fine di trovare le soluzioni che meglio rispondono alla combinazione di tutte le esigenze. Si tratta di un deciso cambio di direzione rispetto agli approcci tradizionali al progetto, che solo da alcuni anni – notevolmente in ritardo rispetto ad altri settori produttivi – sta consolidandosi nella pratica professionale nel comparto edilizio.

L’evoluzione successiva fino allo stato dell’arte attuale si svolge sullo sfondo della cosiddetta Quarta Rivoluzione Industriale, un periodo di rinnovamento dei settori produttivi che trova le sue basi nella compenetrazione tra sistemi fisici e digitali (*cyber-physical systems*) e ridefinisce i contenuti epistemologici dell’industrializzazione edilizia in chiave sostenibile, flessibile e qualitativa. Nello scenario contemporaneo, i sistemi di produzione riescono ad operare una sintesi “tra l’industrializzazione standardizzata (i prodotti) e l’unicità del risultato finale (i progetti)” (Zanelli *et al.*, 2010, p. 9), superando i tradizionali limiti delle tecniche di prefabbricazione rendendole rispondenti alle esigenze del progetto.

5. (Smith, 2010, p. 39)

0000101101101101111010010000101110110101111100101
01110110100111001100000001010011101011111001101011
01100001100010101001000110111101011100001010110000
1101101010100000000111000011100001110011001001100
00101000110000010000101101011001010000110111010010
11001111000111111010010101101000111111000101110101
11001110110000100001100110000000111100100110111100
01011100010110111011111111110001001101111101010001
00010100100100010111011000011011001000101101101010
11000001001001101010001110011000010000011010010101
01110101011100001001100000110100111000110001100010
00100110110111000010001001110010101011101010000111
01100110000110110110111010000100001101000101000101
11001101011001011101100101001111000001000101011000
1101101011001001110001010101010101010000011100101000
11011010111111011010011011111101100001011101100000
11000001000100001111101000110010000101011101111011
11010000101100101001111011111010001001111101111100
110010100010111010101010000110100100101110110110111
11010000010011010111100100001010010000001000011011
1110011100100001011101000011000101111111001001110
0110010100000001000110100110001100110101100001010
01001110111110111000011100011011111110100100000101
10010000001110011101001010101010101100010110011000
10010110101101001111011100111011001110001110110110
01010011001011111100010110011010010001100100001101
11000110101010010001111100100001111100110111011011
00010100110010011110100010111001110011110010110110
00111110011111001001011010111010010011101100010010
00101110001110011111000010100000111110010111111010
11100111101111001000011111000010001100001110111111
100000010110101011101010101001001011111010001101010

II.2 I paradigmi contemporanei della produzione edilizia industrializzata

2.1. La Quarta Rivoluzione Industriale: tecnologie abilitanti per la digitalizzazione e automazione della produzione edilizia industrializzata

Dagli anni Ottanta del Novecento, la produzione industriale è stata progressivamente investita da radicali cambiamenti, sia tecnologici che di approccio, che ne hanno progressivamente ridefinito i paradigmi di riferimento. Nel percorso che ha generato lo stato dell'arte attuale, si possono distinguere quattro principali macro-fasi evolutive, ovvero quattro Rivoluzioni Industriali (Haniel Geschäftsbericht, 2015) che hanno segnato l'integrazione di specifiche innovazioni nei metodi e nelle tecniche di produzione industriale. L'avvio di tale processo viene convenzionalmente riferito al 1765, anno della messa a punto del primo telaio meccanizzato, che sancisce l'inizio della Prima Rivoluzione Industriale. L'epoca è caratterizzata dalla meccanizzazione della produzione tessile e metallurgica, resa possibile dall'estrazione massiva di combustibili fossili, e l'aumento della produttività è tale che permette all'industria di affermarsi come motore trainante dell'economia. Circa un secolo dopo, nel 1870, prese avvio la Seconda Rivoluzione Industriale, sulla scia delle innovazioni introdotte nel campo energetico (principalmente elettricità, gas e petrolio), delle telecomunicazioni (telegrafo, telefono) e dei trasporti (automobile ed aerei). Tali scoperte contribuirono alla definizione di un contesto fertile per l'affermazione della produzione di massa, a sua volta abilitata dall'ottimizzazione dei flussi di lavoro secondo il principio della "catena di montaggio". Come si è visto nei capitoli precedenti, un fondamentale impulso in questa direzione fu fornito dalla teoria taylorista per l'efficientamento della produzione, e dalla sua applicazione nel settore automobilistico da parte di Henry Ford, che contribuirono ad aumentare la produttività, diminuire il costo della manodopera e garantire una vasta accessibilità ai beni consumo anche da parte delle fasce medio-basse della popolazione. Con il manifestarsi della crisi energetica degli anni Settanta, i modelli di produzione si diressero poi verso una Terza Rivoluzione Industriale, un periodo plasmato dall'avvento dei computer e dell'elettronica. Le principali novità di questa terza fase riguardarono nell'invenzione nel 1969 dei Programmable Logic Controllers¹ (PLCs) e nell'avanzamento sulla robotica, che aprirono velocemente la strada a modelli produttivi altamente automatizzati.

A partire da questo scenario, gli scorsi dieci anni hanno visto la trasformazione dell'industria attraverso l'integrazione di una molteplicità di tecnologie ICT basate sul digitale, che hanno modificato profondamente non solo le logiche di fabbricazione, ma anche quelle di gestione dei processi e i modelli di business. La portata dei cambiamenti, tuttora in atto, è stata tale che si sono progressivamente demarcati i limiti di una **Quarta Rivoluzione Industriale**, una stagione di rinnovamento che ha come principale connotazione la compenetrazione e l'interconnessione tra il mondo fisico e quello digitale (si parla a questo proposito di sistemi *cyber-fisici*). Prende forma in questo contesto il concetto di Industria 4.0, introdotto per la prima volta nel 2011 in occasione della Hannover Fair Event (Kagermann *et al.*, 2011, 2013)

per indicare nuovi ecosistemi di produzione intelligente, che sfruttano la digitalizzazione per interconnettere le diverse fasi della filiera, i prodotti e gli strumenti, i macchinari e le risorse umane. In particolare, i principi fondamentali che informano il concetto di Industria 4.0 si basano sul presupposto dell'integrazione, e possono essere sintetizzati come (Oesterreich e Teuteberg, 2016; Clyde&Co, 2018) (Fig.29):

- **Integrazione orizzontale tra le catene di valori**, ovvero l'utilizzo di tecnologie digitali per l'interconnessione e lo scambio di dati lungo il ciclo di vita dei prodotti tra i diversi attori della filiera, ovvero fornitori, consumatori e consulenti esterni, finalizzato a incrementare l'efficienza dei prodotti e dei processi industriali;
- **Integrazione digitale *end-to-end* (Product Life-cycle Management, PLM)** con cui si intende la gestione, tramite piattaforme basate sul web, delle fasi di progettazione e ingegnerizzazione dei prodotti, pianificazione ed esecuzione dei processi, controllo qualitativo, logistica, vendite e rapporto con i fornitori e consumatori. I benefici sono molteplici e riguardano gli aspetti di maggiore interesse per la produzione edilizia industrializzata: flessibilità e possibilità di customizzazione dei prodotti a fronte di minima riconfigurazione delle catene di produzione, incremento delle performance dei prodotti, adattabilità alle variazioni della domanda sul mercato. L'integrazione secondo il PLM prevede inoltre che durante l'esecuzione dei processi, tutti i dati siano raccolti e resi disponibili in tempo reale per gli attori e *stakeholders* coinvolti, in modo da poter essere utilizzati per la progressiva ottimizzazione dei processi e la riprogettazione agile dei prodotti;
- **Integrazione verticale dei sistemi di produzione:** riguarda l'interconnessione tra gli strumenti e i macchinari di produzione, che sono in grado di acquisire, elaborare e scambiare dati sullo stato di avanzamento delle operazioni, sulla presenza di malfunzionamenti e/o sulle quantità richieste, riprogrammando contestualmente le azioni da compiere per mantenere costante la produttività.

L'implementazione di tali principi presuppone l'adozione di una serie di specifiche strategie che interessano sia la gestione del processo industriale che il ciclo di vita delle opere, ovvero (Muñoz-La Rivera *et al.*, 2020):

- **Interoperabilità:** connessione e scambio di informazioni tra gli attori e gli strumenti coinvolti nell'intero ciclo di progettazione, sviluppo e fabbricazione dei prodotti;
- **Virtualizzazione:** digitalizzazione dei prodotti e processi;
- **Decentralizzazione:** possibilità di operare processi di *decision-making* in maniera indipendente in diversi momenti del processo produttivo, ovvero senza interrompere la catena produttiva, senza richiedere la sua riprogettazione e senza causare interferenze per le fasi precedenti e/o successive della produzione;
- **Monitoraggio *real-time*** attraverso l'acquisizione e la condivisione istantanea di dati sull'andamento del processo (quantità di materiale utilizzato, numero di pezzi prodotti, presenza di anomalie e/o malfunzionamenti);

Fig.28 (prima pagina) -

Nel contesto industriale contemporaneo, i paradigmi di riferimento per la produzione edilizia industrializzata si ridefiniscono a partire dalle innovazioni introdotte nel campo del digitale e dell'intelligenza artificiale (Credits: Elaborazione personale da immagine © Microve da www.dreamstime.com)

1. I Programmable Logic Controllers (PLCs) sono dispositivi utilizzati in ambito industriale per la gestione e il controllo automatizzato della produzione (linee di assemblaggio, processi robotizzati). Un PLC può essere considerato come un "computer industriale", composto di una parte *hardware* (schede, porte di ingresso/uscita) e di una *software* (istruzioni del programma da eseguire), in cui alla Central Processor Unit (CPU) è affidato il compito di leggere valori in ingresso acquisiti da sensori e, sulla base delle istruzioni fornite all'unità di programmazione, emettere segnali in uscita per gli attuatori.

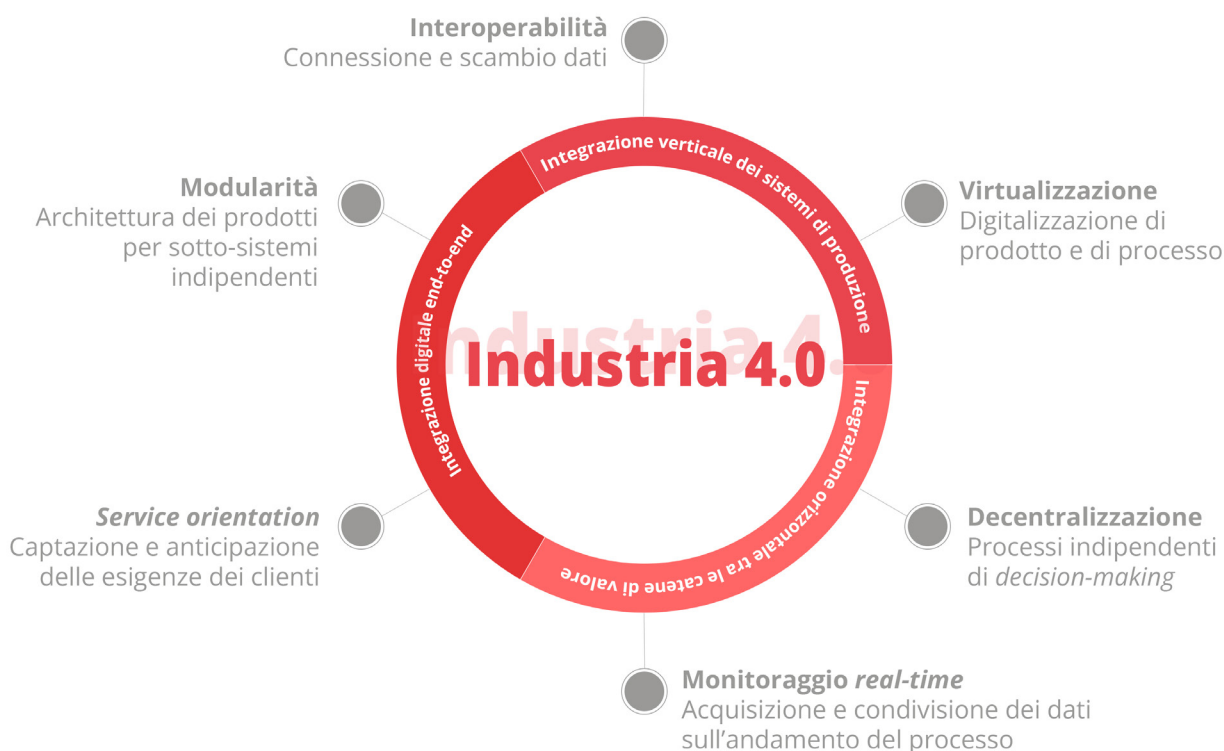


Fig.29 - Principi caratterizzanti dei sistemi di Industria 4.0 (Credits: Elaborazione personale)

- **Service orientation:** capacità da parte delle aziende di captare e anticipare le esigenze dei clienti attraverso la profilazione dell'utenza, in modo da programmare e razionalizzare la produzione in funzione della futura domanda di mercato;
- **Modularità:** l'architettura dei prodotti deve essere concepita per sotto-sistemi quanto più possibile autonomi, che possano essere fabbricati in slot indipendenti per garantire la personalizzazione finale e l'adattabilità della catena di assemblaggio alle esigenze di customizzazione dei prodotti.

L'industrializzazione 4.0, a cui ci si riferisce anche con i sinonimi di "Industrial Internet" o "Digital fabrication" (Clyde&Co, 2018) rappresenta dunque un approccio sistemico generale, che può essere implementato in tutti i settori produttivi. La trasformazione coinvolge anche il comparto AEC, ed è spesso indicata come **Construction 4.0**, termine con cui si intende un processo di progressiva digitalizzazione dei prodotti e processi edilizi, che coinvolge le diverse fasi di sviluppo (Muñoz-La Rivera *et al.*, 2020; Begić e Galić, 2021; Karmakar e Delhi, 2021; Turner *et al.*, 2021):

- **La progettazione integrata** delle opere, ovvero la dematerializzazione delle informazioni ai diversi livelli di approfondimento del concept e progetto di fattibilità tecnica ed economica, progetto definitivo ed esecutivo²;
- **La gestione della produzione industriale** dei componenti e/o degli elementi costruttivi, che comprende non solo la linea di fabbricazione e assemblaggio, ma anche gli aspetti organizzativi delle imprese (logistica, relazioni esterne, gestione aziendale);
- **La cantierizzazione delle opere**, ovvero le tecniche di assemblaggio dei componenti

2. Livelli definiti dal D.Lgs. 18 aprile 2016, n.50 "Codice dei Contratti Pubblici", art.23 – Livelli della progettazione per gli appalti, per le concessioni di lavori nonché per i servizi

in opera, le modalità di interazione tra le maestranze e i macchinari di cantiere, la programmazione temporale e l'organizzazione delle operazioni di montaggio.

Le potenzialità dei cambiamenti in atto sono dovute all'integrazione delle cosiddette "tecnologie abilitanti" (Key Enabling Technologies, KETs³) basate sul digitale, nelle logiche di gestione del processo edilizio, di progettazione e prefabbricazione industriale. Il rapido sviluppo tecnologico ha reso attualmente il panorama delle KETs quantomai ampio e diversificato. La letteratura scientifica non contiene al momento riferimenti sistematici sulla definizione e classificazione delle tecnologie abilitanti, ma è possibile ricostruirne il quadro attraverso un glossario che tiene conto di quelle maggiormente pervasive e impattanti (Hager *et al.*, 2016; Oesterreich e Teuteberg, 2016; Da Costa *et al.*, 2019; Newman *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; You e Feng, 2020; Begić e Galić, 2021; Manzoor *et al.*, 2021) (Fig.30).

→ Artificial Intelligence (AI)

Anche detta *machine intelligence*, include tutte le tecnologie di simulazione artificiale che replicano i meccanismi cognitivi propri dell'essere umano, che avvengono però a fronte di tempi infinitesimali per l'elaborazione dei dati. A differenza della semplice automazione, l'AI implica la capacità dei macchinari di risolvere problemi e formulare le soluzioni per l'ottimizzazione delle sequenze di produzione, che vengono elaborate a partire da dati in input immessi dall'uomo, scambiati da altri dispositivi e/o acquisiti tramite sensoristica.

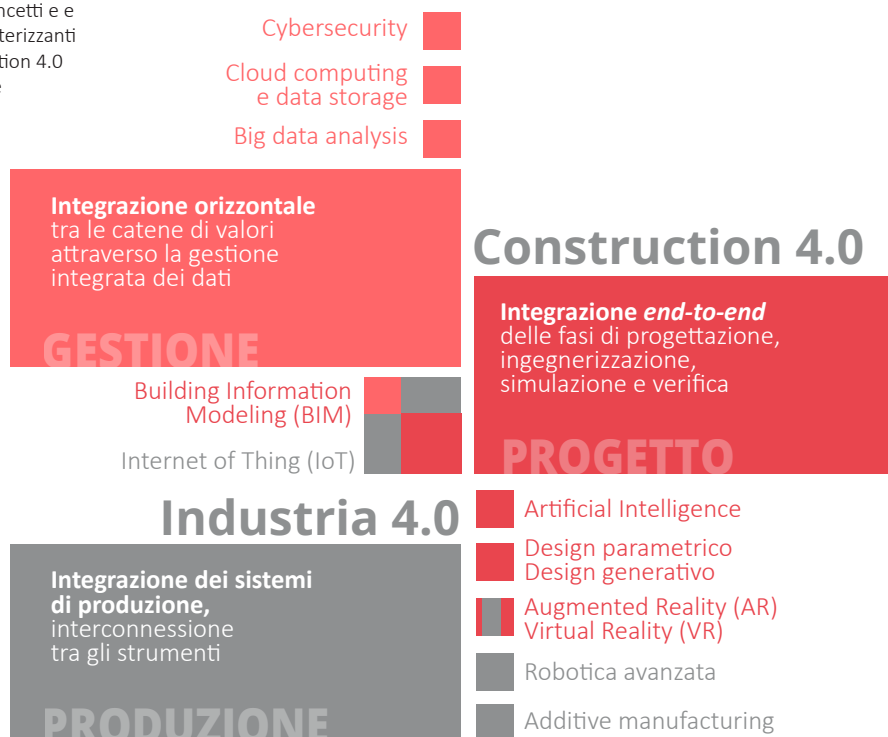
→ Internet of Things (IoT)

Indica l'esistenza di un sistema complesso di dispositivi *smart* (macchinari, strumenti di simulazione, *personal devices*) interconnessi tramite piattaforme in rete, che sfruttando l'AI sono in grado di collezionare e scambiare autonomamente istruzioni per il loro funzionamento e dati sulle loro performance. L'applicazione delle tecnologie dell'IoT, combinata con meccanismi iterativi di apprendimento (*machine learning*), consente agli strumenti di produzione di assumere il controllo sulla gestione dei processi: aggiornare in tempo reale le informazioni sulla composizione del magazzino, calcolare il consumo di materiali, elaborare soluzioni ottimizzate per la fabbricazione dei pezzi, individuare malfunzionamenti e operare processi di auto-diagnostica e manutenzione. Contemporaneamente, l'applicazione di tali tecnologie consente l'invio diretto delle specifiche di progetto ai macchinari di produzione attraverso opportuni formati file di interscambio. Ciò consente di operare secondo un approccio *file-to-factory* che, insieme all'uso di macchinari ad elevata precisione (Computerized Numerical Control machines- CNC, taglio laser, stampanti 3D), garantisce la corrispondenza tra le performance progettate del prodotto edilizio e quelle effettivamente realizzate. Inoltre, le due fasi di progettazione e fabbricazione vengono svincolate dal luogo in cui avvengono, abilitando la dislocazione della produzione secondo i concetti propri del *download design*⁴ (Santachiara, 2016);

3. La Comunicazione COM(2009) 512, *Preparing for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies in the EU*, definisce le KETs come "tecnologie altamente specializzate e ad elevata intensità di ricerca e sviluppo, rapidi cicli di innovazione ed elevate spese di investimento; le KETs consentono l'innovazione di processi, beni e servizi in tutta l'economia ed hanno per questo rilevanza sistemica. Sono caratterizzate dalla multidisciplinarietà, attraversano diverse aree tecnologiche e tendono alla convergenza delle conoscenze e alla loro integrazione".

4. "[...] è quindi sempre più diffuso l'uso di tecnologie che permettono di velocizzare il ciclo produttivo [...]. Il confine tra progetto e produzione è diventato meno marcato. Il prodotto è già tutto presente nella "matematica" di un modello tridimensionale (il progetto) contenuto in un file, stampabile, cioè «fabbricabile», ad esempio, in un centro stampa, un fab lab, vicino al cliente" (Santachiara, 2016, p. III).

Fig.30 - Sintesi dei concetti e delle tecnologie caratterizzanti del modello Construction 4.0 (Credits: Elaborazione personale)



→ Augmented Reality (AR) e Virtual Reality (VR)

Si tratta di tecnologie in grado di virtualizzare ambienti reali e/o progettati attraverso la costruzione di modelli tridimensionali interattivi, interrogabili e fruibili attraverso software, dispositivi portatili e *wearable* (Fig.31). I modelli digitali possono arrivare a rappresentare dei veri e propri *digital twin*, copie digitali di oggetti fisici dei quali simulano le caratteristiche morfologiche, strutturali, percettive, ecc. A differenza della realtà virtuale, quella aumentata consente anche l'interazione tra il modello digitale e l'utente. Gli strumenti per la AR permettono infatti di simulare situazioni immersive in cui l'utente è direttamente proiettato nell'ambiente virtuale. In ambito produttivo, tali tecnologie possono essere utilizzate per la simulazione dei processi di fabbricazione e/o utilizzo dei prodotti, in modo da poterne anticipare le sequenze realizzative e l'esperienza di uso. Attraverso la prototipazione digitale è possibile prevedere l'insorgere di errori, aumentare il grado di sicurezza per i lavoratori, migliorare il prodotto/progetto ancora prima della sua realizzazione, riducendo il rischio di insoddisfazione e ottimizzando le risorse. L'impiego di tali tecnologie favorisce inoltre la collaborazione tra le diverse competenze coinvolte e attiva processi di co-design con i consumatori e i committenti che, attraverso strumenti di semplice fruizione, possono visualizzare in tempo reale l'esito finale e suggerire modifiche da apportare al progetto. Le tecnologie per la AR e VR trovano ormai largo impiego in molti settori industriali, in cui dimostrano interessanti potenziali per una gestione efficace e ottimizzata dei processi. In ambito edile, il dibattito sulla integrazione di tali tecnologie si è ampliato per esplorare la possibilità di replicare tramite *digital twin* non solo i singoli elementi costruttivi e/o componenti, ma interi edifici. Il dibattito sul tema è ad oggi ancora aperto, poiché non si sono ancora raggiunti risultati che ne garantiscano l'immediata applicabilità nelle prassi operative. Il motivo principale è che la digitalizzazione delle opere edili risente della molteplicità di competenze coinvolte e di una maggiore quantità e complessità delle informazioni che devono essere trasposte in dati, interconnesse e coordinate tra diversi strumenti e attori, richiedendo strumenti e infrastrutture di simulazione avanzati che, ad oggi, risultano difficilmente accessibili per molte realtà professionali.

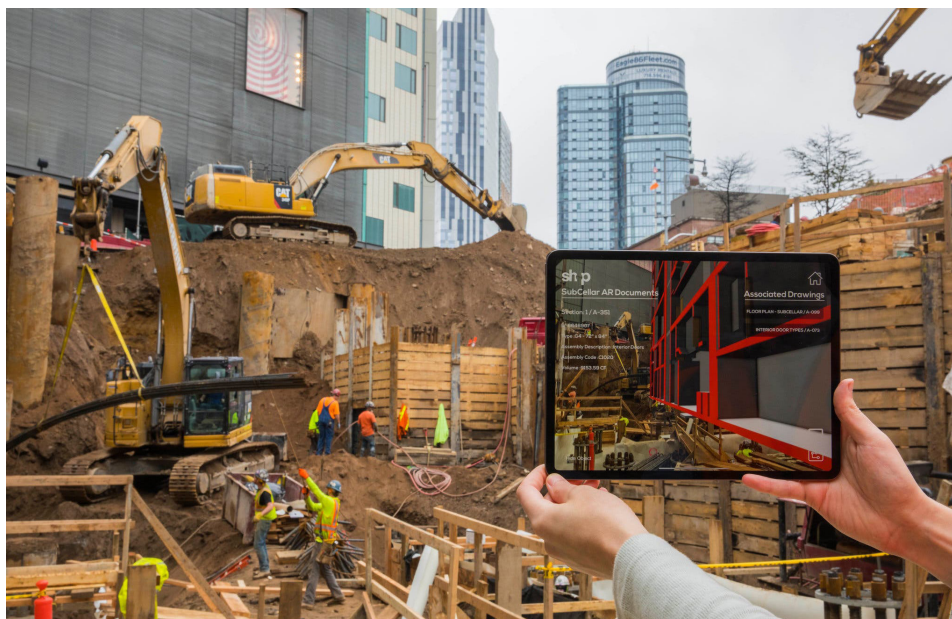


Fig.31 - Esempio di VR utilizzata nelle fasi di cantierizzazione delle opere (Credits: © Hiroko Masuike/The New York Times)

→ Building Information Modelling (BIM)

Si tratta di una metodologia di digitalizzazione del progetto basata su una rappresentazione tridimensionale dell'edificio, che ne replica le caratteristiche geometriche, strutturali e prestazionali e, in questo senso, può essere considerata come una particolare tecnologia di realtà virtuale. Il progetto modellato in ambiente BIM rappresenta, di fatto, un *repository* di informazioni inerenti all'edificio e al suo ciclo di vita, che possono essere estrapolate, condivise e aggiornate simultaneamente per avere una rappresentazione sempre aggiornata del progetto (Schimanski, Marcher, *et al.*, 2019; Schimanski, Monizza, *et al.*, 2019; Tezel *et al.*, 2019). Il BIM si caratterizza per essere utilizzabile nelle diverse fasi di gestione del processo edilizio, dalla progettazione alla valutazione dei costi, dalla realizzazione fino all'uso e manutenzione. Si parla in questo senso di "dimensioni" associate all'uso del BIM; attualmente se ne individuano sette, di cui le prime tre implicite nella modellazione "tri-dimensionale". La classificazione dei livelli del BIM viene ripresa anche dalle norme della serie UNI 11337, che regolano l'utilizzo del BIM in Italia. Le dimensioni individuate sono (Fig.32):

1. **BIM 3D:** Modellazione geometrica tridimensionale finalizzata al *model checking*, ovvero al controllo e verifica del modello, da un punto di vista di rispondenza alle norme (*code checking*) e di controllo delle interferenze costruttive (*clash detection*);
2. **BIM 4D:** Stima dei costi dell'opera;
3. **BIM 5D:** Programmazione delle fasi di costruzione;
4. **BIM 6D:** Gestione in fase di uso e manutenzione, cosiddetto Facility Management (FM) (*as-built*);
5. **BIM 7D:** Valutazione della sostenibilità attraverso analisi LCA, verifica dei protocolli di certificazione come LEED, BREEAM, ecc.

L'uso di tecnologie BIM è considerato come uno degli elementi essenziali per avviare la transizione 4.0 del settore edile, permettendo di ottenere una serie di benefici quali: rapidità di sviluppo dei processi di progettazione, verifica e implementazione delle opere; miglioramento della coordinazione tra i diversi attori e *stakeholders*, che possono condividere simultaneamente in un unico ambiente dati (Common Data Environment, CDE) le modifiche e i rispettivi *feedback*; incremento della qualità del prodotto e del processo edilizio, poiché è possibile operare uno stretto controllo sulle interferenze, errori e incongruenze del progetto; anticipazione delle performance attraverso

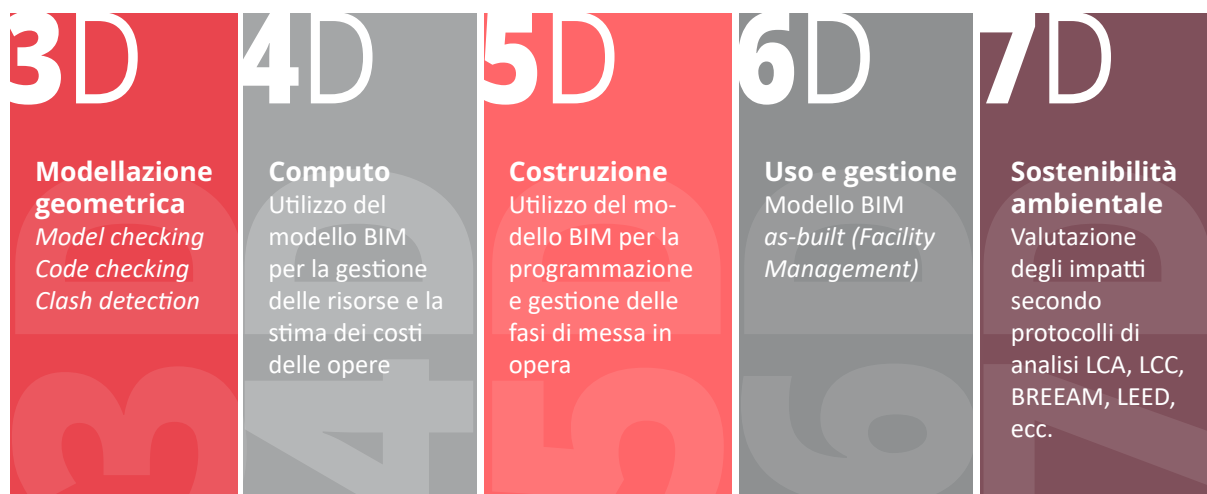


Fig.32 - Dimensioni del BIM e rispettivi ambiti di applicazione
 (Credits: Elaborazione personale)

simulazioni accurate, che tengono conto delle caratteristiche specifiche dell'opera; miglioramento dell'esperienza per il committente e il progettista che lo affianca, potendo contare su strumento di supporto decisionale che permette immediatamente di visualizzare, comparare e valutare le diverse opzioni progettuali (Ma *et al.*, 2016; Abanda *et al.*, 2017; Davidson, 2019; Tezel *et al.*, 2019). Allo stato attuale, anche in recepimento alle normative di settore per l'edilizia pubblica (Cfr. **Pt. I, Cap. 1.5**), l'uso della metodologia BIM sta affermandosi come alternativa stabile rispetto alla gestione tradizionale del processo edilizio, seppure gli ambiti di maggiore applicazione riguardino la sola progettazione architettonica, strutturale e impiantistica. Più limitata è invece l'implementazione del BIM all'interno dei processi di produzione di componenti edilizi, ovvero l'utilizzo diretto dei modelli progettuali come input per le fasi di lavorazione e assemblaggio dei componenti (Ma *et al.*, 2016; Begić e Galić, 2021). In settori come quello della meccanica sono infatti ormai consolidati *workflow* basati sul trasferimento diretto *file-to-factory* delle specifiche esecutive dagli strumenti di progetto ai macchinari di produzione, che avviene per esempio attraverso software CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing). In ambito di produzione edilizia, tale trasposizione richiede una specifica fase di descrizione delle istruzioni per la fabbricazione che, se avviene manualmente, può comportare il rischio di perdita di informazioni e/o di incongruenze tra progetto e produzione. Per ovviare a tali rischi, negli ultimi anni alcune aziende e società private hanno implementato autonomamente programmi *plug-in* che, integrati negli strumenti di modellazione BIM, sono in grado di elaborare, a partire dalle caratteristiche del progetto, le distinte dei pezzi e le specifiche di produzione, in forma di file dati (.csv, .txt, ecc.) che vengono immessi in input per i software gestionali dei macchinari di produzione. In questi casi, l'automazione delle sequenze di progetto-produzione consente non solo velocizzare le sequenze, ma anche di aprire il processo alle possibilità di rapido adattamento dei prodotti rispetto alle richieste dai clienti, a fronte di un elevato controllo qualitativo sul prodotto finale. Una delle sfide aperte in questo settore è perciò quella di ampliare l'applicabilità degli strumenti BIM rispetto alla sola gestione architettonico-strutturale del progetto, rendendo disponibili i modelli come matrice informativa di input che alimenta un ecosistema produttivo *smart*, interconnesso e flessibile.

→ Design parametrico

Rappresenta una forma di cosiddetto “design computazionale”, ovvero una progettazione che utilizza processi e/o programmi gestiti da algoritmi per la definizione delle soluzioni architettonico-edilizie. Il design parametrico impiega specifici software⁵ per modellare tridimensionalmente gli oggetti (componenti edilizi, interi edifici) e legarne alcune caratteristiche morfologiche a dei parametri, ovvero dei numeri che vengono immessi come input all’interno del processo computazionale. Al variare dei dati, l’algoritmo che ne regola la coordinazione restituisce in output una specifica soluzione progettuale, che viene contemporaneamente rappresentata tridimensionalmente. Ne deriva che, attraverso il design parametrico, la progettazione può assumere un numero potenzialmente infinito di configurazioni, delle quali si possono facilmente verificare le prestazioni e la rispondenza alle esigenze di programma.

→ Design generativo

È una forma esplorativa della progettazione che utilizza l’AI e le capacità computazionali dei software per generare, sulla base degli input immessi dal progettista, una gamma di soluzioni che soddisfano i vincoli descritti (Fig.33). Il design generativo sposta la fase creativa dalla sfera di competenza del progettista per demandarla all’intelligenza artificiale, automatizzando i processi complessi di *form finding* e *design optioneering*. Al progettista rimane il compito di selezionare, tra le proposte elaborate dai software, l’opzione che maggiormente risponde agli intenti progettuali con il miglior rapporto costi/benefici. Il design generativo trova oggi grande applicazione nei settori industriali, in modo particolare per la progettazione di componenti meccanici. Nell’ambito delle costruzioni, solo di recente si sono cominciate ad esplorare le possibilità di uso di tale approccio per la progettazione di edifici e/o componenti edilizi; sicuramente, uno dei maggiori limiti alla sua applicazione riguarda l’elevata quantità di vincoli ed esigenze che deve essere considerata nel processo ideativo di un’opera architettonica, che comprendono anche aspetti difficilmente quantificabili e trasferibili in input numerici: sensorialità e percezione spaziale degli utenti, intenti architettonico-compositivi, ecc.

→ Robotica avanzata

Individua il campo di tutti quei macchinari e dispositivi che consentono l’automazione delle sequenze produttive, allo scopo di velocizzare le operazioni e attuare una migliore gestione del flusso di lavoro. Fanno parte della robotica avanzata i dispositivi indossabili (*wearable*), gli esoscheletri, i macchinari per il sollevamento e il posizionamento di carichi pesanti, così come i visori per la realtà aumentata e i droni per i rilievi. I robot possono quindi essere utilizzati sia in officina che in cantiere per agevolare le attività di costruzione, anche con l’obiettivo di rendere più sicure le condizioni di lavoro per le maestranze coinvolte (Davila Delgado *et al.*, 2019).

5. Per esempio, Autodesk Revit®, Grasshopper

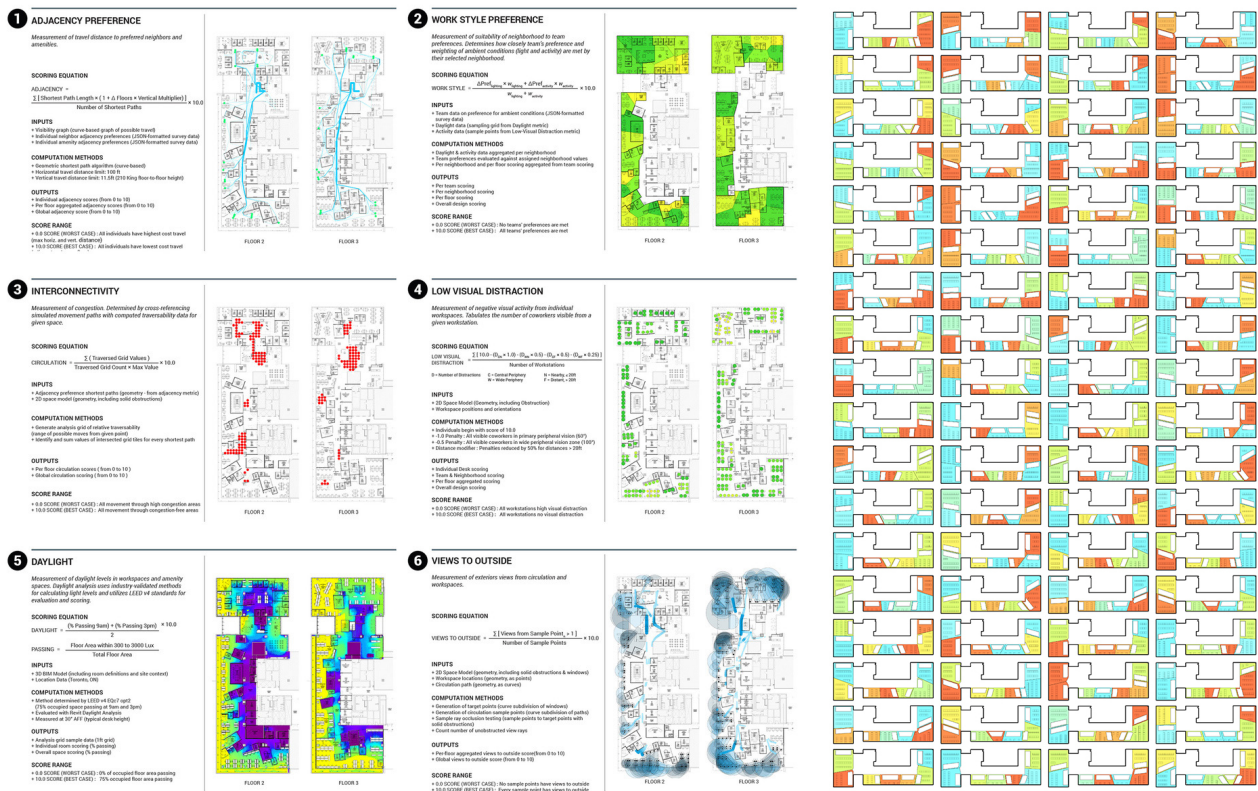


Fig.33 - Processo di *generative design* impiegato nel progetto MaRS Autodesk Office Project (2018): a partire da una serie di vincoli ed esigenze, e sfruttando le capacità computazionali dell'AI, il software è in grado di generare e ottimizzare un ventaglio di possibili scenari progettuali (Credits: © Autodesk da www.autodesk.com)

→ Additive manufacturing (stampa 3D)

È una tecnologia di fabbricazione che consente di creare oggetti tridimensionali a partire dalla modellazione digitale, impiegando stampanti che, tramite iniettori, depositano e stratificano materiali di diversa natura (calcestruzzo, metalli, polimeri e materiali compositi) (Fig.34). Una delle maggiori potenzialità dell'uso di tali tecnologie risiede nella flessibilità della produzione, dal momento che le modifiche sul modello digitale possono essere direttamente trasmesse alle stampanti per creare pezzi sempre diversi, a fronte di minime riconfigurazioni del processo. La precisione della stampa consente inoltre di limitare l'uso del materiale a quello strettamente necessario alla realizzazione degli oggetti, contribuendo a ridurre gli scarti di lavorazione. Ciò incide notevolmente sui costi di produzione, che risultano ridotti rispetto ad altre tecniche di lavorazione (stampaggio, fresatura, colatura). In virtù della sua versatilità, la stampa 3D trova oggi notevole applicazione per la realizzazione di forme complesse, soprattutto nei settori dell'ingegneria meccanica, in quello automobilistico e aerospaziale. In ambito costruttivo, la tecnologia è stata inizialmente utilizzata per la produzione di singoli componenti, soprattutto per elementi di facciata e finiture. Solo da alcuni anni sono state avviate sperimentazioni che mirano a verificarne l'uso anche per la realizzazione di interi edifici. Tale filone di ricerca, seppure si trovi ancora ad uno stato embrionale, ha già prodotto interessanti risultati, dimostrando potenziali di economicità, rapidità, miglioramento delle condizioni di lavoro in cantiere, riduzione degli sprechi di materiale e dell'impatto delle risorse grazie all'uso di leganti naturali (per esempio, terra cruda e fibre minerali).

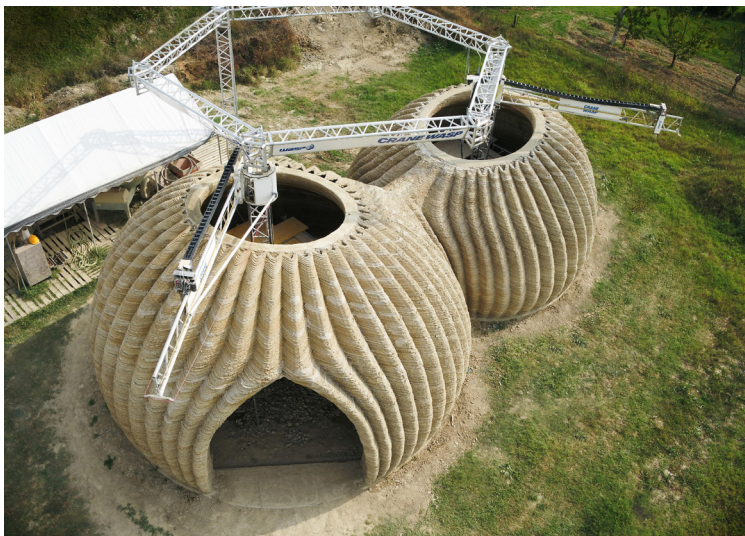


Fig.34 - Progetto TECLA a Massa Lombarda, un modello di abitazione stampata in 3D utilizzando terra cruda (MCA e WASP, 2019) (Credits: © MCA/WASP da www.3dwasp.com)

→ Cloud computing e data storage

L'insieme fa riferimento a tutte le tecnologie software che abilitano la dematerializzazione dei dati, ovvero la loro raccolta, stoccaggio e manipolazione delle informazioni. La disponibilità dei dati in archivi virtuali ne consente l'accessibilità multipla indipendentemente dalla localizzazione, rendendoli maggiormente fruibili e facilitando la collaborazione all'interno dei team di lavoro. Affinché ciò sia possibile, è necessario che siano soddisfatte alcune caratteristiche: accessibilità *on-demand* e *self-service* da parte degli utenti, che devono avere accesso diretto alle risorse online; accessibilità diffusa attraverso dispositivi mobili standard; condivisione multipla da parte degli utenti; elasticità nella capacità di archiviazione; ottimizzazione del servizio sulla base dell'esperienza di uso degli utenti.

→ Big data analysis

Racchiude l'insieme delle tecnologie di raccolta, stoccaggio e analisi di *large data set* non altrimenti gestibili e interpretabili. La caratterizzazione con "Big data" per un set di informazioni raccolte avviene in relazione alle cosiddette "5V": (1) Volume, ovvero la quantità di dati da processare; (2) Velocità, l'ammontare dei dati generati in uno specifico intervallo temporale; (3) Varietà, che fa riferimento ai differenti formati di acquisizione; (4) Valore, cioè la tipologia di informazione estraibile dai dati; (5) Veridicità, vale a dire l'affidabilità delle informazioni raccolte.

→ Cybersecurity

Indica i sistemi e i meccanismi per la messa in sicurezza dei dati in rete, sia di natura industriale che personale di profilazione degli utenti/clienti; il loro ruolo risulta complementare ed essenziale per garantire alle imprese l'attuazione efficace di strategie di digitalizzazione, mettendole al riparo dal furto di dati sensibili.

L'integrazione delle tecnologie abilitanti nelle logiche di gestione dei processi edilizi prefigura per il progetto la possibilità di ri-allineare la qualità del prodotto-processo edilizio agli obiettivi di sostenibilità richiamati dalla programmazione internazionale di settore; analogamente, anche nell'ambito della produzione *off-site* si aprono le prospettive di una radicale trasformazione verso modelli di industrializzazione altamente tecnologici e *smart*, che sfruttano le innovazioni nel campo del digitale per sostenere indirizzi di qualità, sostenibilità, resilienza e circolarità dei prodotti-processi costruttivi.

2.2. Construction 4.0: sostenibilità ambientale, fabbricazione *lean* e customizzazione di massa del prodotto edilizio

L'integrazione delle tecnologie abilitanti nelle metodologie operative e organizzative della filiera edile consente contemporaneamente (1) di traguardare gli obiettivi di sostenibilità economico-ambientale richiamati dalla programmazione comunitaria, e (2) di rispondere più esaurientemente alle esigenze della progettazione, in termini di flessibilità, adattabilità e personalizzazione dei prodotti. Le prospettive di innovazione coinvolgono infatti l'intero processo edilizio, dalla progettazione alla produzione dei componenti prefabbricati, fino alle logiche di programmazione, ai modelli di business e alle relazioni con i clienti (Begić e Galić, 2021; Dubas e Paslawski, 2018; Karmakar e Delhi, 2021; Muñoz-La Rivera *et al.*, 2020) (Fig.35).

Il primo cambiamento riguarda gli **impianti di produzione**, che attraverso l'integrazione delle tecnologie abilitanti abbandonano modelli di industrializzazione pesante, fortemente settorializzati, per diventare *smart factories*, impianti produttivi altamente tecnologici, in cui la produzione è auto-regolata dallo scambio continuo di dati in rete, e in cui i macchinari stessi sono in grado di assumere il controllo di tutte le fasi del processo, dalla gestione del magazzino alla manutenzione delle apparecchiature, per razionalizzare tempi, materiali e risorse (Wang *et al.*, 2020). L'impiego di macchinari ad elevata precisione, controllati numericamente attraverso software digitali e direttamente connessi con gli strumenti di progettazione, consente inoltre di operare uno stretto controllo qualitativo sul prodotto finale, riducendo drasticamente l'insorgenza di difetti e ottenendo la totale aderenza tra le specifiche progettuali e le prestazioni ottenute.

Per quanto riguarda la **progettazione dei prodotti-servizi**, la digitalizzazione si rivela efficace a favorire una maggiore fluidità dei flussi informativi e ad attivare forme di coinvolgimento con le altre competenze e con i clienti/utenti. Nel primo caso, l'utilizzo della modellazione BIM per il progetto genera modelli interoperabili e condivisibili tramite piattaforme *cloud*, permettendo a tutte le diverse figure professionali di lavorare su una base comune che rende immediato l'aggiornamento del progetto e facilita lo scambio di informazioni. Nel secondo caso, in fase di progetto sono rese disponibili per i clienti forme dirette di interazione per la customizzazione dei prodotti, utilizzando per esempio strumenti di realtà aumentata e/o virtuale, piattaforme web e configuratori, che mostrano in tempo reale la configurazione progettuale al variare delle opzioni scelte.

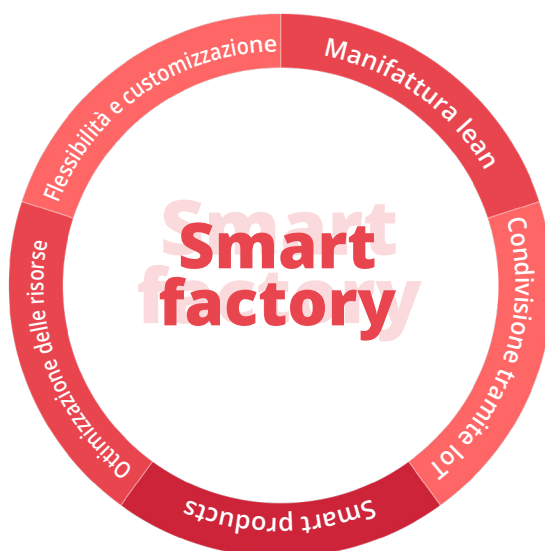


Fig.35 - Innovazione nei sistemi di produzione: principi e caratteristiche di un modello di *smart factory* (Credits: Elaborazione personale)

[Lean operation is]
***Manufacture the right products at
the right time, in the right quantity,
the highest quality, at the lowest cost,
and with the shortest delivery time.***

Reagan, 2004

All'interno della fabbrica 4.0, anche i prodotti stessi si innovano diventando *smart*. Per esempio, l'integrazione di sensori sui componenti edilizi consente di acquisire dati sul loro funzionamento in uso e sullo stato manutentivo; recepiti i dati, un'ulteriore connessione con appositi software e/o *app mobile* permette ai gestori di controllare e programmare le attività di manutenzione, mentre l'interazione con gli utilizzatori e i loro feedback forniscono informazioni per la successiva implementazione dei prodotti. In fase di produzione, i componenti edilizi e i loro sotto-sistemi possono essere integrati con etichette interrogabili, come i codici QR, per verificare lo stato di avanzamento e organizzare la produzione, condividendo gli aggiornamenti con la manodopera in azienda e con la committenza da remoto.

A livello organizzativo aziendale, l'Industria 4.0 adotta i principi propri della **manifattura lean**. Il termine è stato coniato nel 1993 dall'International Group for Lean Construction per riferirsi ad un approccio agile e ottimizzato alla produzione industriale, che razionalizza le risorse per incontrare le richieste dei consumatori. Storicamente, il modello di riferimento è quello sviluppato da Eiji Toyota (1913-2013) per l'omonima casa automobilistica. Nel 1950, in occasione di un viaggio in Michigan (USA), Toyota ebbe infatti l'occasione di studiare il modello fordista e di visitare gli impianti di produzione, intenzionato ad importarne i principi nella sua azienda per potenziarne la competitività. Dall'impostazione produttiva fordista, Toyota riprese l'organizzazione della catena di montaggio come principio cardine per avviare la produzione di massa. Tuttavia, egli credeva che tale assetto non fosse sufficiente per rispondere alle esigenze dei propri consumatori, che richiedevano invece opzioni per la personalizzazione e l'adattabilità dei prodotti. L'obiettivo di Toyota era quello di mediare la qualità ed economicità della produzione con la flessibilità dell'offerta sul mercato; obiettivo che perseguì adottando il principio dell'eliminazione degli sprechi (materiali, tempi, strumenti) da tutti gli aspetti della fabbricazione (Filho *et al.*, 2017). Ancora oggi, la declinazione del paradigma "*less of everything*" costituisce il riferimento per gli approcci alla produzione *lean*, ovvero (Tezel *et al.*, 2019):

- Azzeramento dei rifiuti della produzione, anche attraverso la reimmissione dei materiali di scarto nelle catene di produzione di valore;
- Specifica puntuale delle esigenze dal punto di vista del consumatore, in modo da individuare il processo che più precisamente intercetta i bisogni dell'utenza, eliminando tutti gli step intermedi che non generano ricavo;
- Produzione *customer-pulled*, ovvero una produzione attivata solo dietro specifica commessa dei clienti, per evitare accumuli di materiale invenduto (produzione *just-in-time*);
- Costante riprogettazione dei prodotti per incrementarne progressivamente le prestazioni.

Nell'ambito delle costruzioni, la combinazione di tali strategie con gli strumenti digitali per l'Industria 4.0 e la loro implementazione sistemica lungo l'intero ciclo di vita degli edifici, consente di indirizzare obiettivi di **sostenibilità**

ambientale e di riduzione dell'impatto provocato dalle attività di produzione *off-site*. In fase di progetto, le soluzioni tecnologiche possono essere ottimizzate, sfruttando le capacità di computazione dei software, per ridurre il consumo di materiale e per razionalizzare la successiva produzione dei componenti edilizi, in modo da minimizzare gli scarti di materiale e la conseguente produzione di rifiuti. Questo può avvenire, per esempio, acquistando direttamente dai fornitori i sotto-prodotti dimensionati rispetto ai pezzi da produrre, oppure al contrario dimensionando gli elementi tecnici del progetto sulla base delle forniture disponibili. Una ulteriore ottimizzazione delle risorse si ha attraverso una più efficiente gestione del magazzino, la cui consistenza è controllata da software digitali e programmata in accordo alle specifiche commesse ricevute. Questo limita la possibilità di avere fenomeni di sotto o sovra-produzione e riduce la giacenza prolungata di materiale inutilizzato all'interno del magazzino, che comporta perdite di valore e costi di mantenimento per l'azienda. A livello globale, i miglioramenti approntati sulla gestione del processo edilizio si riflettono in una riduzione del fabbisogno energetico globale delle attività produttive, con conseguente diminuzione delle emissioni di inquinanti in atmosfera (Wang *et al.*, 2020).

Contestualmente agli aspetti ambientali, gli scenari prospettati dalla Construction 4.0 favoriscono anche cambiamenti per una maggiore **apertura e flessibilità della produzione**. Come precedentemente analizzato, all'interno dei settori di produzione si è storicamente evidenziata una netta frattura tra l'approccio improntato all'artigianalità della costruzione e quello industrializzato. Nel primo caso, la produzione si basa su un uso quasi esclusivo della manodopera, a cui è affidato il controllo del progetto, l'esecuzione delle specifiche di fabbricazione, l'ingegnerizzazione e la vera e propria produzione dei componenti. La produzione seriale è – di fatto – resa impossibile, poiché i pezzi prodotti sono sempre diversi e perché la produttività è fortemente limitata dall'elevata componente di manodopera richiesta. Ogni potenziale variazione sul prodotto finale deve prevedere la riprogettazione e riconfigurazione del processo realizzativo, con un notevole aggravio di tempi e costi di produzione. Un ulteriore elemento risiede nelle limitate capacità di controllo della qualità finale dei prodotti, che si lega inevitabilmente alle competenze personali e professionali degli operatori. Con l'avvento delle Rivoluzioni Industriali, i limiti dell'artigianato sono stati superati sfruttando la meccanizzazione per aumentare la produttività, diminuire i tempi e i costi di fabbricazione e ottenere prodotti con un grado di precisione maggiore. Tale cambiamento è avvenuto però a fronte di una rigida standardizzazione della produzione, ovvero fabbricando pezzi sempre uguali come metodo per razionalizzare le risorse impiegate. Per il settore delle costruzioni, è stata questa una delle maggiori cause del fallimento delle esperienze di prefabbricazione, poiché tale impostazione non riusciva a rispondere opportunamente alle richieste di personalizzazione e identità dei progetti.

La rivoluzione avviata dall'Industria 4.0 – rivoluzione che investe tutti i settori di produzione – si pone nei confronti di questa contrapposizione come un approccio funzionale a ristabilire la compatibilità tra una produzione *one-of-a-kind*, in grado di assecondare la necessaria differenziazione delle opere architettoniche, e il mantenimento di alcune caratteristiche di competitività proprie dell'industrializzazione, ovvero la produzione di grandi volumi a fronte di tempi e costi contenuti. Si parla in questo senso di customizzazione di massa, ovvero di un metodo industriale che consente di produrre beni su misura mantenendo i costi di acquisto allineati a quelli della produzione di massa (Pirozfar *et al.*, 2012; Jensen *et al.*, 2016; Hentschke *et al.*, 2019). L'integrazione di sistemi IT che gestiscono la linea di produzione in maniera automatizzata rende infatti possibile la riconfigurazione agile delle sequenze di fabbricazione dei componenti e il loro assemblaggio. La produzione 4.0 si muove secondo un *workflow* flessibile e facilmente riprogrammabile, che riesce ad auto-regolarsi e ottimizzarsi in funzione della domanda e dello stato delle lavorazioni precedenti e successive, delle quali riceve informazioni dirette attraverso lo scambio di dati tra i macchinari collegati in rete. Le modifiche necessarie ad adattare il prodotto in funzione delle richieste della committenza hanno una minima influenza sull'assetto organizzativo di una *smart factory*; ciò significa che non richiedono la riprogettazione del processo, con una drastica diminuzione dei costi e dei tempi necessari alla customizzazione del prodotto finale. Se adottato nelle logiche di prefabbricazione edilizia, un tale approccio consente di superare quei limiti – rigidità, uniformità, monotonia dell'immagine architettonica – che sono stati storicamente le ragioni del fallimento e dell'abbandono della produzione *off-site* in favore dei metodi tradizionali di costruzione.

Uno degli esempi più interessanti in questo senso è il sistema inglese **WikiHouse**, un sistema costruttivo basato su telai in legno che viene prodotto secondo un approccio totalmente digitalizzato *file-to-factory*. L'azienda fornisce ai progettisti e/o committenti un "kit" digitale di componenti costruttivi *open source*, standardizzati e componibili secondo regole di coordinazione modulare. Gli elementi possono essere aggregati in configurazioni progettuali pressoché illimitate, dopodiché le istruzioni esecutive vengono trasferite tramite strumenti CAD/CAM a macchinari a taglio laser a controllo numerico (CNC) che si occupano della produzione dei componenti. Questi vengono poi imballati e spediti al committente, che può assemblarli secondo le istruzioni di montaggio fornite dall'azienda. La dematerializzazione del processo permette di attivare una personalizzazione del prodotto edilizio in ottica di customizzazione di massa, sfruttando logiche di produzione di *download design* che decentralizzano la produzione per adattarla a diversi contesti di intervento. In questo modo, la fabbricazione dei pezzi viene svincolata dal luogo di progetto e non necessita di un unico sito di produzione, ma può intercettare produttori locali per accorciare la filiera. Ciò avviene a fronte di un controllo stringente della qualità dei componenti prodotti, le cui prestazioni, grazie all'uso di macchinari ad elevata precisione, risultano conformi ed allineate a quelle progettate (Open Systems Lab, 2018) (Fig.36).

Rispetto agli scenari di cambiamento avviati nel contesto dell'Industria 4.0, il comparto AEC non ha però ancora sviluppato una strategia matura per la trasformazione dei processi in ottica di Construction 4.0, e risulta tra quelli più arretrati nell'adozione di strategie di digitalizzazione e automazione della produzione industrializzata (Alaloul *et al.*, 2020). Per esempio, uno studio condotto nel 2015 a proposito dell'industria delle costruzioni in Germania ha raccolto dati sul grado di digitalizzazione delle aziende del settore edile. Dalle risposte raccolte, è emerso che il 93% dei *players* del comparto manifatturiero e dei professionisti del settore è concorde nell'affermare che la digitalizzazione avrà sicuramente un forte impatto sui processi, e il 100% del campione intervistato ha dichiarato che continuerà ad implementare strategie digitali all'interno della propria organizzazione. Tuttavia, meno del 6% degli operatori ha attualmente sviluppato un approccio olistico alla digitalizzazione; ciascun attore sviluppa infatti micro-processi digitali

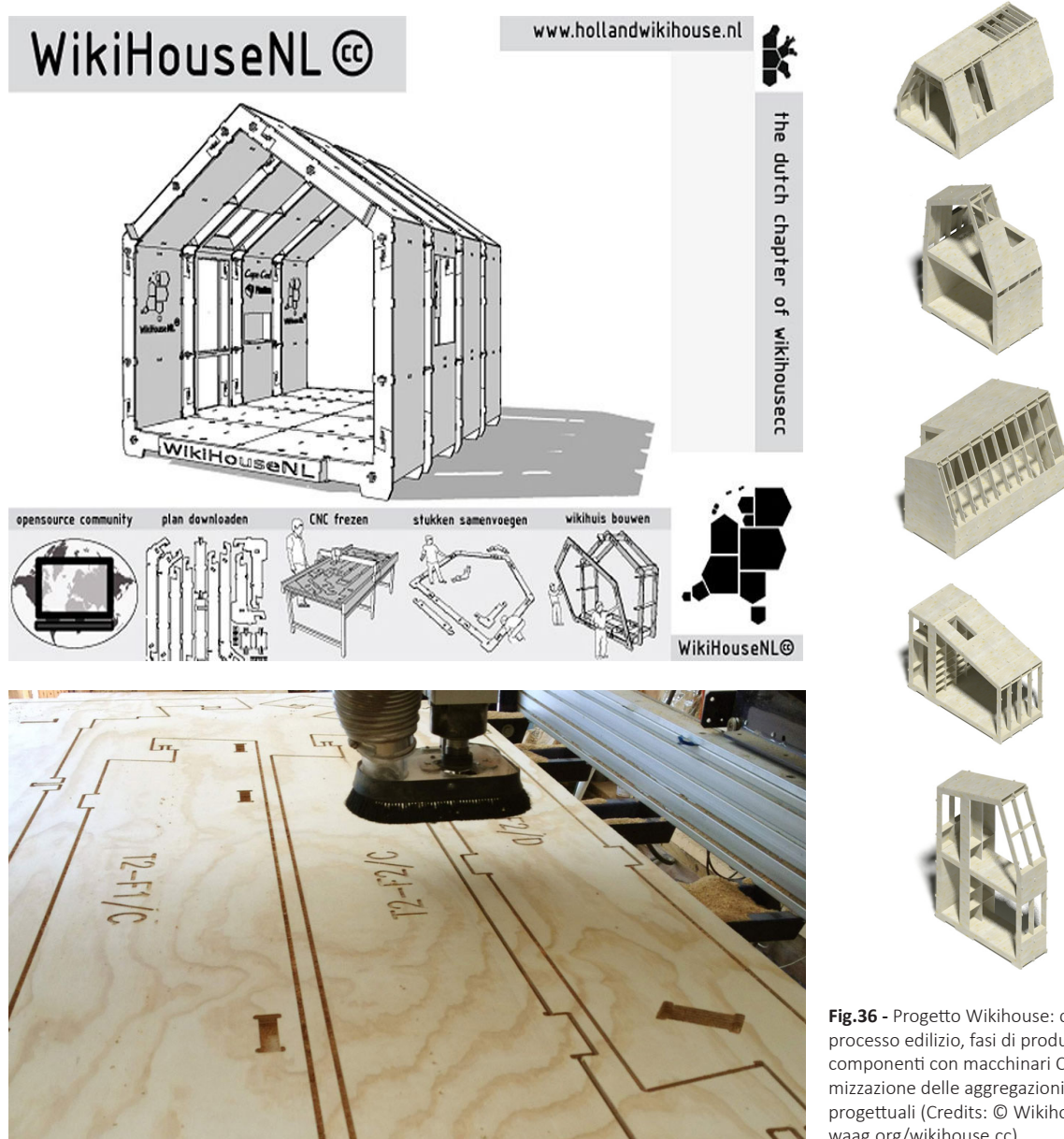


Fig.36 - Progetto Wikihouse: concept del processo edilizio, fasi di produzione dei componenti con macchinari CNC e customizzazione delle aggregazioni progettuali (Credits: © Wikihouse da waag.org/wikihouse.cc)

per la gestione di aspetti specifici della propria attività (ad esempio le aziende per la distribuzione e logistica, i progettisti per la gestione del programma architettonico), e manca una visione sistemica di come la transizione digitale possa apportare benefici in tutti gli aspetti del processo edilizio (Roland Berger, 2020).

Nello stato dell'arte sul tema, uno dei gap rimasti da colmare è dunque la messa in collegamento delle diverse strategie di digitalizzazione per arrivare a coprire la gestione dell'intero ciclo di vita delle opere (Lavikka *et al.*, 2018). Una delle possibilità più interessanti per raggiungere questo risultato riguarda l'utilizzo della modellazione digitale del progetto attraverso strumenti BIM come base comune per l'interconnessione e il dialogo tra le fasi e operatori coinvolti nella progettazione e realizzazione delle opere. Si tratta quindi di trasferire in un'unica piattaforma le informazioni inerenti all'intero ciclo di vita delle opere, affinché possano confluirci e da questa diramarsi i flussi di dati scambiati tra i diversi attori e competenze che intervengono nelle sempre più numerose e complesse fasi di sviluppo dei processi edilizi.

Radical **TECHNOLOGY**

FOOD-SHELTER

TOOLS-MATERIALS

ENERGY-COMMUNICATION

AUTONOMY-COMMUNITY

Edited by
Godfrey Boyle
and Peter Harper

II.3 Tecnologie di prefabbricazione edilizia

3.1. Dalla classificazione tradizionale ai Modern Methods of Construction

La classificazione delle tecnologie prefabbricate non è univocamente definita da letteratura, né da codici e/o standard industriali. La distinzione più generalmente utilizzata è quella che si basa sugli elementi costitutivi del sistema costruttivo, ovvero sul funzionamento strutturale e sul grado di prefabbricazione con cui i componenti vengono prodotti in officina. Secondo questa interpretazione, si possono distinguere tre macro-categorie di sistemi, con grado decrescente di prefabbricazione (Boafo *et al.*, 2016).

→ Sistemi prefabbricati a unità modulari (*Volumetric buildings*)

Prevedono la scomposizione dell'edificio in moduli, ovvero unità volumetriche tridimensionali con struttura auto-portante che vengono assemblate e pre-finite in officina (Fig.38). Le unità possono essere realizzate con struttura a telaio (travi e pilastri) oppure a pannelli, e le chiusure possono essere costituita da sistemi ad intelaiatura leggera o pannelli *sandwich* prefiniti. Il trasporto delle unità può avvenire su ruote, rotaia o via mare, oppure – per unità di dimensioni ridotte e da collocare in siti difficilmente accessibili – per via aerea. Una volta trasportate nel sito di installazione, le unità vengono aggregate e rese solidali attraverso ancoraggi a secco, procedendo poi alla sigillatura dei giunti e alla predisposizione di eventuali opere di completamento. Nello spettro dei livelli di prefabbricazione, gli edifici modulari sono quelli con il grado maggiore di completamento *off-site*, che può arrivare fino al 95% dell'intera costruzione quando si prevede l'integrazione di infissi, rivestimenti e impianti di rete. Una tipologia particolare di sistemi volumetrici sono i cosiddetti "*service pods*", ovvero unità modulari, integrate in strutture portanti esterne, in cui vengono accentrati i servizi tecnologici; tali sistemi vengono prevalentemente impiegati per opere a grande scala (alberghi, complessi residenziali), poiché consentono di ottimizzare la distribuzione delle reti impiantistiche e di ridurre in maniera sostanziale i tempi di realizzazione in cantiere.

Rispetto agli altri sistemi di prefabbricazione, le tecnologie modulari presentano una serie di problematiche di natura tecnica ed economica, in particolare:

- Costi di trasporto generalmente elevati, legati alla necessità di trasportare volumi vuoti, motivo per cui è necessaria un'attenta analisi costi-benefici per valutare l'opportunità di utilizzo di tali sistemi in relazione all'incidenza delle fasi di trasporto;
- Elevato peso della struttura, soprattutto per le tecnologie massicce in calcestruzzo e legno, che richiede la presenza in sito di sistemi di carico ingombranti, non sempre utilizzabili se vi sono vincoli di accesso o dimensionali dell'area;



Fig.37 - Copertina del libro *Radical Technology*, AA.VV. (1976) Editori Peter Harper, Godfrey Boyle e Undercurrents (Credits: © 1976 Undercurrents Limited)

Fig.38 - Sistema costruttivo a unità volumetriche tridimensionali prefabbricate (Credits: Hamarks: www.hamarks.co.uk)

- Necessità di sovra-dimensionare le strutture per supportare i carichi dinamici dovuti al trasporto e al sollevamento dei moduli per la messa in opera, con conseguente aumento di peso, di materiale e di costi;
- Limiti dimensionali che vincolano la variabilità e la flessibilità delle configurazioni spaziali, motivo per cui i sistemi modulari vengono principalmente impiegati per tipologie edilizie che richiedono una forte tipizzazione serialità delle unità ambientali, come edifici ospedalieri, uffici, alberghi.

Per mitigare l'incidenza delle fasi di trasporto, negli ultimi anni alcune aziende hanno sviluppato soluzioni "flat-packed" o con meccanismi di dispiegamento *pop-up* che consentono di ridurre il volume occupato dai moduli, diminuendo di conseguenza l'impatto sia economico che ambientale associato al trasporto. Per limitare ulteriormente l'onerosità del trasporto, e soprattutto quando il sito di installazione risulta eccessivamente distante dal luogo di produzione, è possibile prevedere un'organizzazione della produzione dei moduli in due fasi: la prima che prevede la produzione dei sotto-sistemi (struttura portante e sistemi di chiusura) in azienda, e la seconda, che riguarda le operazioni di assemblaggio e completamento dei moduli, da approntare in un'officina allestita temporaneamente in prossimità del cantiere (Lawson *et al.*, 2014; Navaratnam *et al.*, 2019; Salama *et al.*, 2017; Generalova *et al.*, 2016; Smith e Quale, 2017).

→ Sistemi prefabbricati a pannelli (*Panelized buildings*)

Prevedono l'utilizzo di elementi piani bidimensionali (pareti, solai) per la realizzazione di strutture portanti continue verticali e/o orizzontali (Fig.39). Le pannellature possono essere realizzate con tecnologie a telaio leggero (*platform frame*, LSF), massicce (CLT, calcestruzzo prefabbricato o parzialmente gettato in opera) o con pannelli stratificati (pannelli *sandwich* in alluminio coibentati in schiuma, Structural Insulated Panels- SIP). Il grado di completamento in officina è minore rispetto ai sistemi modulari, e varia in media dal 30 al 50% dell'edificio completo. Se confrontate con le tecnologie di prefabbricazione modulare, quelle a pannelli offrono una versatilità maggiore in termini di configurabilità spaziale; i pannelli possono essere infatti aggregati secondo molteplici *layout* spaziali, che non risentono dei rigidi vincoli imposti invece dalla segmentazione dell'edificio in moduli standardizzati. Anche le operazioni di trasporto risultano facilitate in virtù della possibilità di stoccare e impilare i pannelli, seppure permangano le stesse criticità dovute al sovra-dimensionamento strutturale per garantire la manovrabilità dei pezzi (Knaack *et al.*, 2012; Smith e Quale, 2017).



Fig.39 - Sistema costruttivo a pannelli bidimensionali prefabbricati
(Credits: SIP Europe: www.sipeurope.eu)



Fig.40 - Sistema costruttivo a elementi lineari prefabbricati (telaio)
(Credits: Premac Prefabbricati da archiproducts.com)

→ Sistemi prefabbricati a telaio (*Site-intensive kit of parts*)

Sono composti di elementi lineari (pilastri e travi), prodotti a partire da semi-lavorati, uniformati sulla base di standard dimensionali definiti da codici industriali, che vengono aggregati a mezzo di connessioni a secco (Fig.40). Gli elementi possono essere realizzati in acciaio, tramite profili sottili presso-piegati in acciaio o alluminio, in legno lamellare, o in calcestruzzo armato precompresso. I sistemi a telaio presentano, tra quelli analizzati, il minor grado di prefabbricazione e completamento *off-site*, e vengono prevalentemente utilizzati nel campo delle opere infrastrutturali (ponti, viadotti, ecc.) e delle mega-strutture (Knaack *et al.*, 2012; Smith e Quale, 2017).

Negli ultimi anni, alle tecnologie di prefabbricazione edilizia si sono affiancati anche una serie di strumenti, operativi e gestionali, a supporto delle fasi di fabbricazione e assemblaggio dei componenti, che ne migliorano la capacità di controllo, la qualità e la sicurezza per gli operatori. Ne sono un esempio i dispositivi mobili, le tecnologie *wearable*, i robot e macchinari automatizzati che coadiuvano, sia in fabbrica che in cantiere, le operazioni di produzione e messa in opera dei componenti. L'insieme di tali tecnologie e dispositivi viene indicato con il termine di **Modern Methods of Construction (MMC)**, che si riferisce a tutto il complesso delle tecnologie avanzate per la costruzione. Nel 2017, la classificazione dei MMC è stata oggetto di un lavoro di sintesi portato avanti in Gran Bretagna, su impulso del Ministry of Housing, Communities & Local Government (MHCLG), da una partnership tra il MHCLG Joint Industry Working Group e gli *stakeholders* del settore pubblico e privato. Gli esiti sono stati condensati nel *MMC Definition Framework*, un documento che sistematizza la classificazione dei più recenti sistemi di produzione edilizia *off-site*, seppure all'interno del *framework* vengano ricomprese anche tecnologie come la stampa 3D che non prevedono l'assemblaggio fuori opera di parti e/o componenti dell'edificio.

In particolare, il *MMC Definition Framework* individua sette categorie, alcune delle quali riprendono la classificazione già precedentemente descritta (AA.VV., 2019):

MMC.1 Sistemi strutturali tridimensionali prefabbricati: individua un approccio sistemico basato su unità tridimensionali prodotte in condizioni controllate all'interno dell'officina. Le unità volumetriche possono essere prodotte *off-site* e trasportate al sito di installazione secondo diversi gradi di completamento, dalla sola struttura portante fino

all'integrazione delle finiture interne ed esterne e i sistemi di impianto. Nella categoria si distinguono diverse tipologie di unità modulari con diversi livelli di prefabbricazione:

- Unità volumetriche con solo telaio strutturale;
- Unità volumetriche con telaio strutturale e allestimenti interni;
- Unità volumetriche con telaio strutturale, allestimenti interni e rivestimenti;
- Unità volumetriche con integrazione di servizi tecnici e impianti (*service pod*);

Le diverse tipologie possono essere utilizzate e aggregate secondo tre sistemi di configurazione:

- Intero edificio con sistema a unità volumetriche;
- Costruzione ibrida: nucleo al piano terra realizzato con tecnologie tradizionali e piani successivi con unità volumetriche;
- Costruzione ibrida (per edifici con elevato sviluppo in altezza): sistema a unità volumetriche integrato in una struttura portante esterna per migliorare le prestazioni di resistenza meccanica.

MMC.2 Sistemi strutturali bidimensionali prefabbricati: indica un approccio basato sull'utilizzo di pannelli lineari con funzione strutturale per la realizzazione di pareti verticali e solai orizzontali di pavimento e copertura. I pannelli vengono prodotti all'interno della fabbrica, quindi trasportati e assemblati in sito per la costruzione. L'approccio più comune è quello di utilizzare pannelli cosiddetti "aperti", ovvero pre-assemblati con la sola struttura portante, che vengono successivamente completati con le finiture in opera. Pannelli più complessi, tipicamente indicati come pannelli "chiusi", presentano un grado di prefabbricazione maggiore, e includono sistemi di isolamento termo-acustico, servizi, infissi, finiture e rivestimenti. Nella categoria dei sistemi strutturali bidimensionali si possono quindi distinguere tre macro-categorie con grado progressivo di prefabbricazione:

- Pannelli con struttura portante per pareti, solai di pavimento e di copertura;
- Pannelli con struttura portante, integrati con sistema di isolamento termico e rivestimento interno e/o esterno;
- Pannelli con struttura portante, integrati con sistema di isolamento termico, rivestimento interno ed esterno, infissi e sistemi di impianto (cablaggi).

MMC.3 Componenti primari strutturali prefabbricati: rappresenta un approccio basato sull'uso di elementi strutturali prefabbricati come pilastri, travi, orizzontamenti o nuclei strutturali. In particolare, rientrano in questa categoria gli elementi prefabbricati utilizzati per le mega-strutture e le opere infrastrutturali, come pali di fondazione e/o di contenimento, collegamenti verticali pre-assemblati, capriate e solai prefabbricati.

MMC.4 Manifattura additiva: indica lo stampaggio 3D di parti e/o di interi edifici, che può avvenire in officina o nello stesso sito di costruzione. Lo stampaggio può riguardare componenti strutturali e/o non strutturali, e può prevedere l'uso di diverse tipologie di materiali: miscele naturali (argilla, terra cruda), polimeri plastici, calcestruzzo e miscele a base cementizia.

MMC.5 Componenti prefabbricati non strutturali: in questa categoria sono ricompresi una serie di differenti approcci che prevedono il pre-assemblaggio di elementi non strutturali, al fine di ottimizzare e semplificare le operazioni di trasporto e successiva messa in opera in cantiere. Rientrano per esempio in questa categoria:

- Unità volumetriche non strutturali per servizi (*pods*), assiami di cucina e/o bagni, impianti centralizzati;
- Assemblaggi di pannelli lineari: sistemi di involucro non strutturale (verticali e orizzontali), assiami per impianti e servizi (colonne montanti, dorsali di distribuzione), sistemi di infissi pre-assemblati (Fig.41).

MMC.6 Prodotti da costruzione tradizionali che promuovono la riduzione della manodopera in cantiere e il miglioramento della produttività: comprende tutti quei prodotti da costruzione, normalmente prodotti come elementi singoli, che vengono però fabbricati e assemblati in componenti di grande formato, in configurazioni pre-tagliate o con

caratteristiche di giuntura semplificate per ridurre l'entità della manodopera in cantiere richiesta per l'installazione. Fanno parte di questa categoria i prodotti di rivestimento per esterni e interni, gli elementi di completamento per le coperture, i materiali tradizionali pre-dimensionati e tagliati su misura, così come le innovazioni sui sistemi di connessione a secco e/o di giunzione/interfacciamento (cablaggi modulari, tubazioni flessibili, giunti *fastener*, ecc.).

MMC.7 Processi e tecnologie per il cantiere che promuovono la riduzione della manodopera, l'aumento della produttività e il miglioramento della sicurezza nelle fasi di realizzazione in sito: individua il complesso di tecniche di

costruzione innovative destinate all'efficientamento delle fasi di cantierizzazione delle opera, tra cui si citano:

- Tecnologie per il controllo del sito, come recinzioni utilizzabili per il monitoraggio ambientale;
- Sistemi di impalcatura automatizzati;
- Tecnologie digitali per la programmazione del cantiere e la pianificazione del flusso di lavoro (BIM 4D, BIM to field¹);
- Esoscheletri, visori per la realtà aumentata, dispositivi indossabili intelligenti (*wearables*) (Fig.42);
- Robotica per l'automazione del cantiere, droni, attrezzature autonome, strumenti di verifica digitale del sito (fotogrammetria, scansione).

Il *MMC Definition Framework* descrive quindi un panorama estremamente ampio e diversificato delle frontiere di innovazione nel campo della produzione industrializzata, prefabbricata e/o automatizzata. Rispetto alle classificazioni precedenti, la novità consiste nel riconsiderare una serie di tecnologie informatizzate e basate sul digitale (come i dispositivi *wearable*, i robot, la stampa 3D, ecc.) che ampliano lo spettro delle tecniche e metodologie costruttive prefabbricate, prefigurando un insieme di nuovi approcci e strumenti che potenziano la qualità e l'efficienza dei processi edilizi.



Fig.41 - Sistemi e componenti prefabbricati non strutturali (MMC Categoria 5) (Credits: © Acton Ostry Architects Inc. and University of British Columbia)



Fig.42 - Esoscheletri utilizzati durante le fasi di movimentazione dei componenti e messa in opera per migliorare la sicurezza e salute degli operatori (MMC Categoria 7) (Credits: BiBlus BIM: bim.acca.it)

1. Cfr. Pt. II, Cap. 2.1.

3.2. Materiali, tecniche e metodi di produzione industrializzata

Le principali tecnologie costruttive prefabbricate sono quelle basate sull'uso dell'acciaio, del legno e del calcestruzzo. Nei primi due casi, va osservato che è la stessa natura dei materiali a richiedere intrinsecamente la produzione fuori opera di elementi e/o semi-lavorati, e si tratta perciò di tecnologie che si legano necessariamente ai concetti di prefabbricazione e industrializzazione. Per ciascuna macro-categoria, le opzioni per la prefabbricazione variano dalla produzione di singoli elementi costruttivi lineari (travi, pilastri), fino alla fabbricazione *off-site* di componenti per pareti – con funzione strutturale o di tamponamento – che possono essere ulteriormente prefabbricati in officina nella forma di unità volumetriche pre-finite internamente e/o esternamente.

→ Tecnologie di prefabbricazione in acciaio

Tra le tecnologie costruttive, quella dell'acciaio è stata tra le prime a dare avvio al processo di industrializzazione edilizia, e nella sua evoluzione storica è stata quella che ha maggiormente influenzato lo sviluppo delle tecniche di prefabbricazione. Le prime applicazioni si rintracciano alla fine del 1700, e sono state rese possibili dalla vasta disponibilità del materiale unita alla meccanizzazione della produzione, introdotta dalla Rivoluzione Industriale.

L'acciaio è una lega composta dalla combinazione di ferro e carbonio, con una percentuale di quest'ultimo inferiore al 2.11%; a questi si aggiungono anche piccole quantità di altri metalli (alluminio, silicio, manganese) che, una volta combinati con l'ossigeno durante la lavorazione, formano scorie facilmente eliminabili. L'acciaio utilizzato per applicazioni edilizie è di tipo dolce o extradolce, ovvero presenta un contenuto di carbonio ridotto, ed ha un comportamento plastico alla deformazione. La classificazione dell'acciaio è attualmente definita dalla norma UNI-EN 10027-2, che descrive le regole per la denominazione degli acciai sulla base delle loro caratteristiche prestazionali e di impiego.

Fin dalle prime applicazioni, l'acciaio ha trovato largo impiego come materiale da costruzione in virtù delle elevate prestazioni meccaniche (resistenza meccanica, duttilità), di resistenza al fuoco e di leggerezza (rapporto peso/resistenza), che ne garantiscono un'ampia flessibilità progettuale. Alcune delle principali criticità legate all'uso dell'acciaio riguardano invece: la suscettibilità agli agenti atmosferici e la facilità di corrosione; l'elevata specializzazione della manodopera richiesta per la produzione e il montaggio in opera degli elementi; i costi maggiori rispetto alle altre tecnologie costruttive. Inoltre, nell'ottica di riduzione dell'impatto ambientale del ciclo di vita della tecnologia, si deve considerare che i processi di estrazione e lavorazione del materiale risultano particolarmente energivori e con elevato potenziale di emissioni. Tale impatto è parzialmente mitigato dalla possibilità per l'acciaio di essere riciclato senza perdita di prestazionali, ottenendo prodotti che hanno le medesime caratteristiche del materiale vergine (Staib *et al.*, 2007).

La produzione industriale dei componenti in acciaio prevede la realizzazione sia di elementi standardizzati a catalogo che speciali, questi ultimi realizzati a fronte di specifiche richieste del progetto; in questo caso, diventa fondamentale l'interazione tra le competenze progettuali e quelle dell'azienda, in modo da garantire la fattibilità della produzione stessa e limitare la presenza di errori, anche considerando che ogni pezzo, una volta prodotto, non può essere modificato. La produzione dei semilavorati può avvenire per profilatura, laminazione a caldo o a freddo o per presso-piegatura, ottenendo profili sagomati a sezione variabile, lamiere stirate o grecate. Il collegamento tra gli elementi costruttivi avviene meccanicamente tramite chiodatura o bullonatura, oppure per fusione attraverso saldatura.

Il campo dei sistemi costruttivi in acciaio si suddivide in:

- **Sistemi a telaio:** prevedono l'uso di elementi lineari (travi, pilastri) in acciaio laminati a caldo con diverse sezioni (IPE, HE, scatolari) che assolvono alla funzione portante dell'edificio e sono collegati tramite piastre e ancoraggi

meccanici. I sistemi a telaio vengono generalmente utilizzati per quelle opere che richiedono altezze elevate; nel caso di strutture che richiedano grandi luci libere, per gli elementi di trave vengono impiegate travi di tipo alveolare o reticolare, che consentono di ottimizzare il rapporto tra resistenza e leggerezza degli elementi. Per strutture di grandi dimensioni, è possibile prefabbricare anche strutture reticolari spaziali, ovvero intere sezioni di copertura che vengono giuntate insieme in fase di cantiere (Fig.43);

- **Sistemi a frame leggero:** anche detti *Cold-Formed Steel (CFS)* o *Light (Lightgauge) Steel Frame (LSF)*, si basano sull'uso di telai prefabbricati portanti in acciaio, composti da profilati in acciaio (montanti e traversi) formati dalla presso-piegatura di coil in acciaio di ridotto spessore (2-5 mm). Il particolare processo di lavorazione consente di ottenere prodotti con elevata precisione, e di ottimizzare al tempo stesso il materiale, riducendo la produzione di scarti e rifiuti. I pannelli LSF possono essere utilizzati come pareti continue con funzione portante, fino ad un massimo di 5 piani, oppure come elementi di chiusura nei sistemi a telaio. Le chiusure sono realizzate con componenti stratificati a secco con pannelli isolanti e irrigidimento in lastre di materiale composito – fibrolegno, pannelli OSB – e possono essere integrati in officina con cablaggi e reti di impianto (Knaack *et al.*, 2012) (Fig.44).

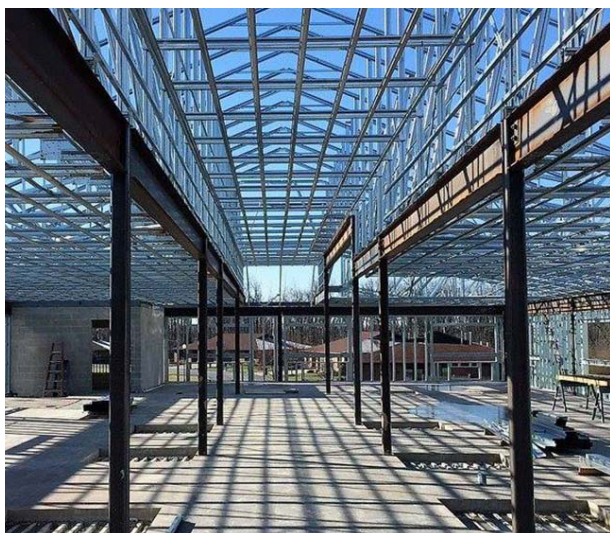


Fig.43 - Sistema costruttivo a telaio in acciaio (Credits: Limberlost Construction, Inc.: www.limberlostconstruction.com)



Fig.44 - Sistema costruttivo a frame leggero in acciaio (Light Steel Frame, LSF) (Credits: The Steel Network: steelnetwork.com)

→ Tecnologie di prefabbricazione in legno

Le tecnologie costruttive in legno hanno avuto grande sviluppo fin dall'antichità. Per secoli, il legno è stato utilizzato come materiale costruttivo in virtù della sua facile reperibilità, della durabilità e resistenza, nonché della sua facilità di lavorazione. Negli ultimi anni, l'utilizzo del legno è stato riscoperto e apprezzato in funzione delle intrinseche capacità di isolamento termo-acustico del materiale, con effetti positivi sulla sensazione di comfort e benessere degli spazi interni, nonché per la sua resistenza strutturale anti-sismica, che lo rende particolarmente efficace nelle zone a rischio terremoto. L'avanzamento della ricerca sui sistemi di ingegnerizzazione del legno ha inoltre portato alla messa a punto di nuove tecnologie ad elevate prestazioni (legno lamellare, Cross Laminated Timber (CLT)), che ne hanno ampliato il campo applicativo a nuovi settori, come edifici multipiano, edilizia scolastica, commerciale e produttiva. Inoltre, la crescente attenzione alle tematiche di sostenibilità ambientale ha fatto riscoprire i potenziali del materiale in quanto materia prima circolare, di origine naturale e perciò a basso impatto², con oltretutto una intrinseca capacità di stoccaggio della CO₂. Tra i sistemi costruttivi prefabbricati in legno si trovano:

- **Sistemi a parete massiccia:** si tratta della tecnologia cosiddetta *Cross Laminated Timber* (CLT), che prevede l'uso di pannelli portanti continui costituiti da strati di tavole (3-5-7 strati) sovrapposti l'uno sull'altro, incrociati e alternati in modo che l'andamento delle fibre di uno strato sia ruotato di 90° rispetto a quello sottostante. I singoli strati sono composti da tavole di spessore variabile tra i 19-40 mm e hanno una larghezza compresa tra 80-240 mm, che vengono resi solidali mediante l'uso di colle poliuretaniche e/o melamminiche (colle bianche). L'utilizzo di colle rappresenta ad oggi una delle maggiori problematiche dei sistemi CLT, in quanto rende difficili le operazioni di separazione e smaltimento dei pannelli a fine vita. Per questo motivo, alcune aziende e centri di ricerca hanno sperimentato l'uso di tecniche di produzione "a incastro" prive di sostanze chimiche. Per esempio le tecnologie Eco-Xlam di SOCEC³ o bio-xlam[®] di Lignaconstruct⁹⁴ prevedono l'assemblaggio delle tavole di legno attraverso graffe di acciaio zincato a caldo, che rendono solidali gli strati ma permettono, al tempo stesso, di disassemblarli al termine dell'uso. Una volta assemblati gli strati, i pannelli vengono tagliati con tecniche di taglio laser secondo le specifiche del progetto, predisponendo l'alloggiamento degli infissi e degli impianti; la linea di produzione può inoltre prevedere il completamento *off-site* degli elementi di completamento e finitura, nonché l'integrazione degli infissi. Considerato il funzionamento monolitico della parete, occorre tenere in considerazione che i pannelli, una volta prodotti, non possono più subire modifiche. Questa particolare condizione richiede che le specifiche progettuali siano definite in maniera puntuale, e che la fattibilità delle soluzioni architettonico-compositive sia verificata in stretta sinergia con l'azienda produttrice. Una volta prefabbricati, i pannelli vengono stoccati e trasportati in cantiere, dove sono sollevati e posti in opera attraverso collegamenti a secco, realizzati con piastre chiodate in acciaio (piastre allungate dette "hold down", piastre angolari e bande forate). A livello prestazionale, il peso

2. La riduzione dell'impatto del ciclo di vita delle tecnologie in legno richiede comunque ad una gestione sostenibile delle fonti di approvvigionamento. A questo proposito, l'associazione non governativa Forests Stewardship Council (FSC) attribuisce il marchio FSC[®], a seguito di un rigoroso protocollo di certificazione, a tutti i prodotti contenenti legno proveniente da foreste gestite in maniera responsabile, ovvero che rispettano specifici standard di qualità ambientale, economica e sociale.

3. <https://socec.it/wp-content/uploads/2019/01/Scheda-tecnica-eco-xlam.pdf>

4. <https://lignaconstruct.com/traumhaus-suedtirol/services-view/bio-xlam-2/?lang=it>



Fig.45 - Sistema costruttivo a parete massiccia in legno (Cross Laminated Timber, CLT) (Credits: Simpson Strong-Tie: www.strongtie.co.uk)



Fig.46 - Sistema costruttivo a *frame* leggero in legno (*platform frame*) (Credits: © Rothoblaas: www.rothoblaas.it)

elevato degli elementi parete garantisce buoni livelli di isolamento e inerzia termica, caratteristiche che rendono la tecnologia particolarmente efficace per il clima mediterraneo (Fig.45);

- **Sistemi a *frame* leggero:** anche detti *platform frame*, si tratta di una tecnologia costruttiva sviluppata come evoluzione del *balloon frame*⁵ nordamericano, che prevedeva la costruzione di strutture portanti continue a partire da elementi snelli in legno (montanti) resi solidali tramite chiodatura. I sistemi a *platform frame*, in maniera analoga a quelli LSF in acciaio, prevedono l'uso di elementi di parete e solaio bidimensionali, con funzione portante e/o di tamponamento, formati da telai piani di montanti e traversi in legno, che vengono irrigiditi orizzontalmente da pannelli in materiale composito (come lastre OSB, fibrolegno, ecc.) con funzione di controventamento. L'intercapedine è riempita con materiale isolante di varia natura e, al contrario dei pannelli massicci, consente l'integrazione degli impianti senza la necessità di realizzare contropareti. La produzione fuori opera avviene secondo una linea di assemblaggio continua, utilizzando tavoli di montaggio che si muovono tra le varie celle di lavorazione. Rispetto ai sistemi massicci, quelli a telaio presentano prestazioni termo-acustiche inferiori, ma hanno il vantaggio di essere più leggeri, più economici e meno onerosi in termini di sollevamento, trasporto e montaggio in cantiere (Knaack *et al.*, 2012; Lupacchini, 2018) (Fig.46).

→ Tecnologie di prefabbricazione in calcestruzzo

Nella loro accezione più tradizionale, le tecnologie costruttive in calcestruzzo prevedono la realizzazione degli edifici direttamente in cantiere attraverso il getto dell'agglomerato nelle casseforme predisposte in sito. Essendo il processo di maturazione del materiale profondamente suscettibile alle condizioni esterne (temperatura, umidità, pioggia, ecc.), le tecniche di prefabbricazione offrono un sostanziale contributo nel velocizzare le operazioni di messa in opera. Storicamente, la prefabbricazione del calcestruzzo si è sviluppata contestualmente alla messa a punto delle tecniche di precompressione, ed è stata largamente impiegata nel campo delle infrastrutture e dell'edilizia industriale. Il processo di prefabbricazione prevede il getto del materiale all'interno di casseforme riutilizzabili in acciaio o plastica, all'interno delle quali sono predisposti i ferri di armatura. Uno degli elementi di criticità legati al processo di prefabbricazione è la rigidità della personalizzazione; ogni modifica sull'elemento finito richiede infatti la progettazione e realizzazione di specifiche casseforme, rendendo più economicamente conveniente la produzione in serie di elementi standardizzati.

Da un punto di vista ambientale, la produzione del calcestruzzo risulta un processo energeticamente intensivo, con elevati livelli di emissione di sostanze inquinanti; a livello mondiale, si stima infatti che la lavorazione del materiale sia responsabile di circa il 5% della produzione di CO₂. Inoltre, per quanto attiene alla circolarità delle risorse, occorre notare che le particolari modalità di produzione e messa in opera, che prevedono la realizzazione

5. La tecnologia *balloon frame* si basa sull'uso di elementi lineari snelli in legno (montanti e traversi) che si sviluppano per tutta l'altezza dell'edificio e che vengono giustapposti per realizzare elementi bidimensionali piani, ovvero pareti leggere in legno con funzionamento a telaio. L'attribuzione dell'invenzione della tecnologia è stata per anni oggetto di dibattito; se inizialmente si faceva risalire la prima comparsa al progetto della St. Mary's Church a Fort Dearborn (Chicago, USA) nel 1833 ad opera di George Snow, in seguito si è dimostrato che la tecnologia era già stata sperimentata l'anno precedente da Augustine Taylor nella costruzione di un magazzino a Chicago (Sprague, 1981).

di oggetti monolitici, compromettono la possibilità di separazione dei componenti costruttivi a fine vita, ovvero la loro dismissione selettiva per avviare i componenti a riuso/riciclo.

Le tecnologie di prefabbricazione in calcestruzzo si suddividono in:

- **Sistemi a telaio:** prevedono la prefabbricazione di elementi lineari come travi e pilastri, anche precompressi, la cui produzione può essere di tipo standardizzato (a catalogo) oppure specifica secondo le esigenze del progetto. Gli elementi prefiniti, stoccati in officina, vengono poi spediti, installati e collegati in cantiere attraverso sistemi di ancoraggio in acciaio e/o getti di completamento in cls. Gli orizzontamenti dei solai possono anch'essi essere realizzati attraverso elementi piani bidimensionali prefabbricati, per esempio pannelli alveolari in calcestruzzo o solai tralicciati. Gli elementi di tamponamento possono essere realizzati con sistemi a telaio leggero in acciaio o legno, oppure con pannellature leggere in calcestruzzo o pannelli tipo *sandwich* coibentati (Fig.47);
- **Sistemi a pannelli prefabbricati:** impiegano pannelli bidimensionali prefabbricati che realizzano strutture portanti continue, verticali e orizzontali. I pannelli sono realizzati fuori opera predisponendo, all'interno delle casseforme, l'armatura in acciaio secondo le specifiche da calcolo strutturale. Una volta completato il getto e atteso il periodo di maturazione del calcestruzzo, i pannelli possono essere sollevati e trasferiti in cantiere per l'installazione finale. Essendo i pannelli elementi pesanti, spesso si preferisce utilizzare una tecnica di parziale prefabbricazione fuori opera; le pareti sono prefabbricate attraverso la giustapposizione di due lastre in calcestruzzo (che fungono da casseforme a perdere), separate da una intercapedine in cui vengono alloggiati tralicci metallici di armatura. Gli elementi strutturali così prodotti vengono installati in cantiere e, una volta posizionati, vengono completati con un getto di calcestruzzo all'interno dell'intercapedine che rende solidale la costruzione (Fig.48);
- **Sistemi a unità modulari:** le unità volumetriche vengono realizzate attraverso un'unica colata all'interno di casseforme in cui sono predisposti i ferri di armatura. Il prodotto che ne risulta è un sistema monolitico, ovvero celle tri-dimensionali che vengono trasportate e aggregate in cantiere. Storicamente, la tecnologia modulare in calcestruzzo è stata tra le prime ad essere sperimentata, ma ad oggi trova sempre minore impiego nei settori dell'edilizia civile. Un primo limite alla sua diffusione è rappresentato dalla ridotta flessibilità delle configurazioni progettuali,



Fig.47 - Sistema costruttivo a elementi lineari (telaio) prefabbricati in calcestruzzo armato precompresso (Credits: Mid-States Concrete Industries: www.msprecast.com)



Fig.48 - Sistema costruttivo a pannelli prefabbricati in calcestruzzo (Credits: © Syspro-Gruppe da www.bft-international.com)

che devono essere limitate per ammortizzare i costi di produzione delle casseformi, in ottica di economia di scala. Un ulteriore fattore critico riguarda inoltre l'elevato peso delle unità, soprattutto se comparate con quelle a telaio leggero in acciaio o legno, che rende onerose le operazioni di sollevamento, spostamento e installazione dei moduli;

- **Stampa 3D⁶**: le tecnologie di *additive manufacturing* che usano il calcestruzzo vengono attualmente impiegate sia per la produzione di componenti costruttivi (travi, pareti portanti) che per la stampa di interi edifici. Il processo che porta alla realizzazione dei componenti e/o edifici ha inizio con la progettazione digitale degli elementi da stampare; questa fase viene gestita attraverso software di modellazione tridimensionale, anche utilizzando tecniche di design parametrico e/o generativo. Una volta fissate le specifiche progettuali, queste vengono trasferite al software di gestione della stampante, attraverso la scrittura di un programma che descrive il percorso seguito dalla stampante per stratificare il materiale. Il *workflow* così descritto risulta automatizzato nel trasferimento della soluzione progettuale alla fase realizzativa; questo permette non solo un controllo stringente sulla qualità finale, ma anche un'elevata flessibilità nella customizzazione del prodotto. L'elevato grado di automazione rappresenta uno dei motivi del crescente interesse di cui è oggetto la tecnologia, poiché il controllo informatico del processo permette – almeno potenzialmente – ai macchinari di gestire da soli tutte le fasi realizzative dell'opera. Tuttavia, attraverso l'esperienza diretta sul campo, si è potuto osservare come la totale automazione del processo sia ad oggi solo parzialmente raggiunta. Nella realtà infatti, il processo realizzativo richiede una notevole interazione tra gli operatori e i macchinari di stampa, necessaria per la preparazione della miscela di materiale, il controllo dei parametri di stampa (velocità, quantità di materiale depositato) e l'integrazione dei ferri di armatura all'interno del calcestruzzo (Staub *et al.*, 2007; Miller e Moore, 2020) (Fig.49).

6. Il processo di stampa 3D è approfondito con riferimento all'uso delle tecniche di *additive manufacturing* in calcestruzzo per la realizzazione di elementi strutturali (travi, pareti portanti continue). La stessa tecnica trova però applicazione anche in altri settori produttivi, come l'arredamento, l'ingegneria meccanica e le biotecnologie, in cui la viene utilizzata in combinazione con altri materiali (polimeri plastici, materiali compositi con fibre naturali, ecc.) e per la realizzazione di oggetti di uso quotidiano, di componenti per macchinari o applicazioni in campo medico. Per approfondimenti, si segnala il volume di A. Kaziunas France, *Stampa 3D. Concetti di base, tutorial e progetti*, Tecniche Nuove, Milano, 2014.



Fig.49 - Edificio realizzato con la tecnica della stampa 3D in calcestruzzo (Credits: © CEN@bemore3d)

Da un punto di vista organizzativo, per ciascuna tecnologia la produzione industriale dei componenti e sub-componenti può avvenire secondo dimensioni e caratteristiche standardizzate, oppure secondo le specifiche esecutive richieste dal progetto. La possibilità di adottare l'una o l'altra strategia è strettamente legata all'organizzazione commerciale adottata dalle aziende, ovvero dal livello di standardizzazione della produzione. A questo proposito, si possono distinguere quattro principali approcci alla produzione, che presentano un grado crescente di possibilità di personalizzazione, direttamente proporzionale al costo e ai tempi di realizzazione. In particolare si distinguono (Smith, 2010):

- **Made-to-Stock (Mts)**: la produzione avviene sulla base di uno *stock* continuo di elementi prefiniti e standardizzati, che viene costantemente rifornito sulla base di una previsione di massima dei futuri ordini. Il prodotto finale è quindi di tipo standardizzato, e la scelta del cliente/committente deve indirizzarsi tra quelli messi a disposizione a catalogo. In ambito edile tale strategia viene adottata prevalentemente da sub-fornitori di materiali e componenti, come per esempio i produttori di elementi di finitura (piastrelle, pannelli di rivestimento) o di elementi strutturali (travi, pilastri, travetti, ecc.);
- **Assembled-to-Stock (AtS)**: l'azienda che adotta questo tipo di strategia ha a disposizione un set predeterminato di elementi prefiniti, che possono essere assemblati sulla base di regole di coordinazione per ottenere prodotti finiti diversificati. In questo senso, la modalità AtS riprende alcuni dei concetti di razionalizzazione propri del Mts, ma rende possibili una serie di opzioni di personalizzazione da parte del cliente;
- **Made-to-Order (MtO)**: la produzione è attivata direttamente dalla domanda di mercato, ovvero sulla base di specifici ordini. Il prodotto finale è personalizzabile sulla base delle esigenze del progetto, seppure vi siano alcuni aspetti dimensionali e di coordinazione standardizzati e pre-verificati per esigenze di ottimizzazione dei tempi di fornitura. Si tratta della strategia prevalente adottata dalle aziende del settore della prefabbricazione, in quanto consente di rispondere efficacemente alle richieste di personalizzazione della committenza ed evita, allo stesso tempo, di disperdere risorse producendo più di quanto verrà effettivamente venduto;
- **Engineered-to-Order (EtO)**: rappresenta il grado maggiore di personalizzazione possibile, e per questo viene anche chiamato come *Designed-to-Order (DtO)*. La difficoltà dell'approntare tale tipo di strategia risiede nella necessità di offrire prodotti su misura pur mantenendo costi e tempi di produzione allineati a quelli della produzione a catalogo.

Il quadro di tecnologie di prefabbricazione attualmente disponibili sul mercato offre dunque un panorama ampio di possibilità con caratteristiche prestazionali variabili. Le scelte progettuali rispetto al quadro che si prospetta dipendono da un insieme di considerazioni di natura ambientale, economica e sociale, da valutare rispetto alle istanze progettuali e ai vincoli del programma architettonico-edilizio: reperibilità e disponibilità locale dei materiali, prestazioni, tempi e costi di intervento, tipologia edilizia. A prescindere dalle specifiche strategie adottate, risulta comunque essenziale che il processo decisionale venga sviluppato attraverso uno stretto rapporto di condivisione dei desiderata da parte dei diversi *stakeholders* e utenti coinvolti, e che venga guidato, fin dalle fasi preliminari, da un progettista in grado di individuare limiti e potenzialità delle diverse opzioni. La specificità dei sistemi tecnologici prefabbricati richiama infatti la necessità di considerarne i vincoli progettuali fin dalle fasi iniziali della programmazione, in modo da considerare e integrare i particolari accorgimenti propedeutici alla fabbricazione industriale dei componenti. Capire e assecondare la natura del contesto produttivo di riferimento, anche attraverso il supporto degli operatori del settore, significa per la progettazione rendere possibili i potenziali di qualità di processo prefigurati dalla prefabbricazione; al

contrario, operare asincronicamente rispetto alla produzione industriale, chiedendo ai tecnici di post-coordinare scelte progettuali e vincoli di fabbricazione, rende il processo edilizio a rischio di integrazione di modifiche progettuali, anche sostanziali, oppure di dover ricorrere a soluzioni non standard, che aumentano tempi e costi di intervento anche oltre ai limiti stabiliti dal programma edilizio.

3.3. Il ruolo della normativa di settore: implicazioni all'approccio progettuale

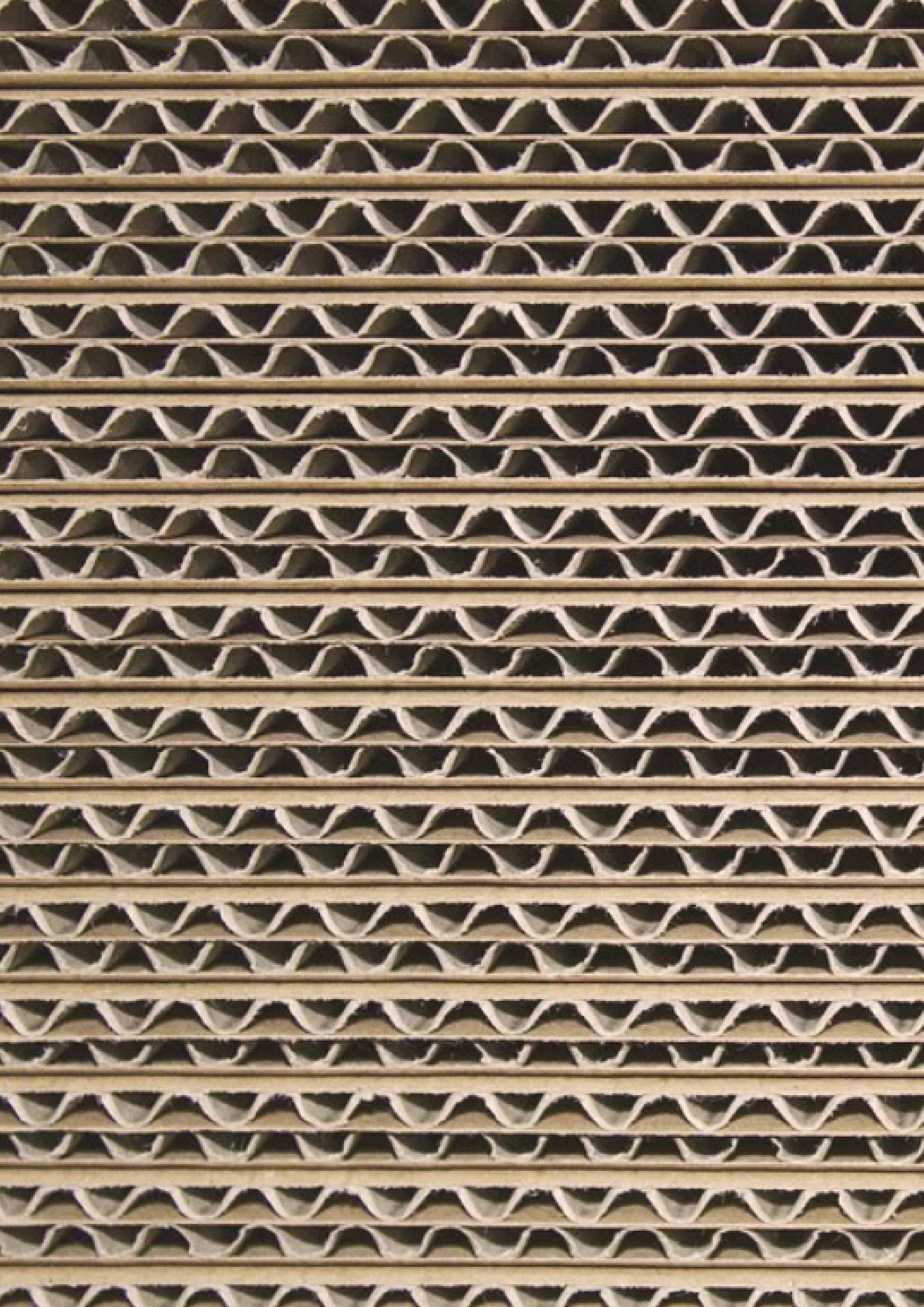
Il quadro legislativo di riferimento per l'edilizia prefabbricata risulta dall'unione delle normative vigenti per il settore delle costruzioni con quelle che regolamentano gli aspetti di qualità dei processi industriali. A livello nazionale, la progettazione di edifici prefabbricati è difatti normata dalle **Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC), D.M. 14/01/2008**, che stabilisce le modalità per di calcolo e verifica di opere realizzate con componenti prefabbricati in calcestruzzo, legno o acciaio. A queste si sommano le norme tecniche di livello internazionale, comunitario e nazionale, ovvero rispettivamente le norme della serie ISO, EN e UNI, che definiscono la normalizzazione dimensionale di specifici prodotti e/o standardizzano le modalità di produzione industriale di materiali e componenti.

Considerata la necessità di trasportare i componenti dalla fabbrica al sito di installazione, particolare importanza riveste anche la verifica della rispondenza ai limiti dimensionali stabiliti dal **Codice della Strada, D.Lgs. n. 285/1992 e ss.mm.ii**. In particolare l'art.61 stabilisce che la dimensione massima della sagoma debba avere larghezza massima non superiore a 2.55 m, altezza massima non superiore a 4 m e lunghezza massima non superiore a 12 m. Tali dimensioni rappresentano un vincolo che è necessario integrare nella progettazione dei componenti fin dalle fasi iniziali; verificare gli aspetti normativi legati al trasporto risulta un passaggio essenziale non solo a contenerne i costi, ma anche ad ottimizzarne il numero in ottica di riduzione delle emissioni inquinanti. La trasportabilità dei componenti con mezzi ordinari assicura inoltre la possibilità di raggiungere siti difficilmente accessibili, come zone rurali o contesti post-disastro, in cui la prefabbricazione può fornire una risposta rapida alle esigenze di infrastrutturazione emergenziale.

Ad eccezione di questi riferimenti, nella legislazione nazionale non vi sono indicazioni specificatamente rivolte alle tecnologie di prefabbricazione edilizia; è interessante invece osservare come in alcuni Paesi esteri i processi edilizi basati sulla prefabbricazione sono oggetto di una regolamentazione *ad hoc*. La specificità delle tecnologie realizzative e la loro sempre maggiore hanno infatti spinto enti pubblici e privati a dedicare codici specifici alla normazione delle sequenze di progettazione, fabbricazione, trasporto e installazione di edifici prefabbricati. Un riferimento in questa direzione è quello degli Stati Uniti, dove nel 2019 è stato avviato un tavolo di lavoro tra l'International Code Council (ICC) e il Modular Building Institute (MBI)⁷ con l'obiettivo di descrivere un insieme di standard, complementari rispetto alle normative per le costruzioni, indirizzati puntualmente a normare la qualità del

7. Il Modular Building Institute (MBI) è un'organizzazione internazionale *no-profit* che associa operatori pubblici e privati del settore della prefabbricazione modulare, occupandosi di tematiche di ricerca, sviluppo e normazione.

processo di progettazione e realizzazione di edifici realizzati con tecnologie prefabbricate. Il risultato è stata l'emanazione della **ICC 1200-200x, Standard for Off-Site Construction: Planning, Design, Fabrication and Assembly**, un riferimento sistematico per definire gli standard di qualità a cui devono allinearsi tutti i processi di prefabbricazione. Nello specifico, il codice stabilisce i requisiti inerenti alla programmazione delle opere, definendo i ruoli delle diverse figure coinvolte, le azioni richieste a ciascuno per garantire la continuità dei flussi informativi nelle diverse fasi, i criteri per la localizzazione della fabbrica rispetto al sito di costruzione, le modalità di *early engagement* degli *stakeholders*, i tempi e le scadenze per l'approvvigionamento e la fornitura dei materiali. La ICC 1200-200x stabilisce inoltre gli standard tecnico-operativi da rispettare al fine di assicurare la qualità del processo di prefabbricazione, e fornisce schemi per l'organizzazione del cantiere, modelli di cronoprogramma che sincronizzano la produzione con la consegna dei componenti in cantiere e il loro montaggio, diagrammi di flusso per la gestione delle aziende e maestranze presenti contemporaneamente in cantiere. Quello statunitense rappresenta un interessante precedente di innovazione del panorama normativo sul tema della prefabbricazione edilizia che, riconoscendo la peculiare complessità della costruzione prefabbricata, offre uno strumento a guida di tutti gli attori coinvolti nel processo per abilitare appieno i potenziali di qualità delle costruzioni prefabbricate. Al contrario, la mancanza di indirizzi specifici per progettazione e messa in opera di tecnologie basate sulla prefabbricazione può contribuire ad allontanare i progettisti dalla loro adozione, privandoli del supporto necessario ad approcciare un nuovo tipo di logica costruttiva. I miglioramenti prospettati dalla produzione *off-site* rispetto alle tecniche tradizionali sono infatti resi possibili solo a patto di gestire correttamente l'inevitabile maggiore complessità del progetto, delle fasi e delle competenze coinvolte nel processo edilizio, che dovrebbe trovare nella normativa tecnica di settore indirizzi di supporto e standard di riferimento a cui allinearsi.



II.4 Materiali innovativi a ridotto impatto ambientale: il cartone come materiale costruttivo

4.1. Perché il cartone?

Rispetto alla necessità di definire nuovi strumenti e metodi di risposta alle esigenze di infrastrutturazione scolastica di emergenza, ai *decision makers* spetta il compito di selezionare e adottare opportune modalità tecnico-operative in grado di assicurare la corrispondenza con le molteplici istanze architettoniche, spaziali, ambientali ed economiche che costituiscono il quadro esigenziale. Per i progettisti, tale indirizzo richiede di produrre una serie valutazioni rispetto alle prestazioni dei sistemi di prefabbricazione attualmente disponibili sul mercato, riflessioni che necessariamente devono inserirsi nel quadro degli obiettivi di transizione ecologica del comparto edilizio. Nell'attuale scenario della programmazione strategica di settore, trovano sempre maggiore interesse e potenziali di applicazione quelle tecnologie costruttive che assicurano un uso razionale delle materie prime, e che riducono le emissioni inquinanti attraverso processi a bassa intensità di energia e filiere virtuose di recupero, riciclo e ri-manifattura dei componenti costruttivi. La circolarità dei processi edilizi, se fino a qualche anno fa rappresentava una scelta facoltativa di progettisti e operatori del settore AEC, ad oggi costituisce un elemento di prioritario interesse per tutti gli interventi di edilizia pubblica, reso cogente dalla normativa di settore (CAM), che a sua volta interpreta gli indirizzi di programmazione dell'UE. Questa posizione si rafforza ulteriormente nel contesto dell'infrastrutturazione per l'emergenza e, più in generale, nelle esigenze dell'abitare contemporaneo, ovvero in tutti quei campi di applicazione che risultano connotati a paradigmi di elevata transitorietà e ad esigenze di flessibilità, adattabilità e reversibilità degli interventi. Rispetto alla necessità di rapida dismissione e riassemblabilità dei manufatti edilizi, risulta infatti indispensabile interrogarsi sulle modalità con cui i flussi di materia vengono reimmessi all'interno delle catene di valore dei prodotti.

Un'interessante linea di ricerca che si confronta con questi obiettivi, già emersa dalla ricognizione dei casi studio su edifici scolastici emergenziali (Cfr. **Pt. I, Cap. 3.3**) è quella che riguarda l'**utilizzo del cartone come materiale costruttivo**. Già da alcuni decenni, il cartone è stato utilizzato per usi in edilizia in virtù della sua capacità di combinare elevate prestazioni meccaniche con una intrinseca eco-compatibilità e circolarità del ciclo di vita. Come si avrà modo di approfondire, il cartone è ottenuto dalla carta di cellulosa, a sua volta derivata dalla lavorazione della fibra di legno; quest'ultima proviene da foreste che, se gestite in accordo ai protocolli di certificazione internazionale (per esempio FSC), assicurano un uso sostenibile e razionale delle risorse naturali, addirittura contribuendo alla loro crescita nel tempo attraverso pratiche di sfoltimento e rimboschimento programmato. Oltretutto, la lavorazione della pasta di cellulosa, da cui si ottiene la carta, intercetta le sole risorse di scarto della filiera di produzione del legno, in quanto utilizza il materiale residuo proveniente dalle segherie, contribuendo ulteriormente alla riduzione dei rifiuti (Rogora, 2006). Quella della carta è inoltre una filiera contraddistinta da una elevata circolarità; i dati raccolti nel 2020 da Comieco¹

hanno stimato una percentuale del 94.8% di riuso e dell'87.3% di riciclo degli imballaggi a base cellulosa (Comieco, 2021). Insieme alla sostenibilità economico-ambientale del ciclo di vita del materiale, le tecnologie costruttive basate sull'utilizzo del cartone si rivelano particolarmente appropriate ad assecondare la transitorietà e reversibilità delle condizioni di uso degli edifici, in particolare grazie alla leggerezza e dismissibilità selettiva dei componenti che, a loro volta, garantiscono la semplicità e rapidità di intervento, la ciclicità delle operazioni di assemblaggio-smontaggio e la ricollocabilità dei manufatti.

Il campo di sperimentazione sull'uso del cartone come materiale da costruzione lascia dunque prefigurare ampi margini di efficacia nella risposta alle esigenze di infrastrutturazione scolastica emergenziale, e in particolare a quelle di sostenibilità e circolarità del processo edilizio. Si tratta di un campo di indagine ancora aperto, che finora ha visto applicazioni prevalentemente limitate a processi sperimentali, sviluppati nel contesto degli *shelter* di prima emergenza, e rimangono insolite una serie di domande legate alla validazione per usi di medio-lungo termine, con particolare riferimento all'ambito applicativo dell'edilizia scolastica. Con l'obiettivo di verificare la compatibilità delle tecnologie costruttive in cartone con il quadro esigenziale che si è delineato per l'intervento emergenziale scolastico, i capitoli successivi ne indagano lo stato dell'arte e sviluppano l'analisi prestazionale, con particolare riferimento agli aspetti di sostenibilità ambientale, ricostruendo un quadro conoscitivo propedeutico alla successiva comparazione con altri MMC disponibili nel mercato europeo.

4.2. Caratteristiche e prestazioni del cartone ondulato per gli usi edilizi

La tecnologia del cartone ondulato è stata messa a punto del 1875 da J.H. Thompson, che la sviluppò a partire dalla "carta ondulata", formata da un foglio ondulato incollato su un foglio teso, detto "copertina". Incollando sopra all'ondulazione un'ulteriore copertina, Thompson si accorse che il materiale che otteneva, il cartone ondulato, forniva una maggiore resistenza, e poteva essere perciò impiegato per molteplici usi aggiuntivi rispetto a quelli possibili sino ad allora. Il cartone ondulato propriamente detto è perciò un materiale costituito dalla sovrapposizione di diversi strati di carta tesa e ondulata, che vengono incollati e resi solidali attraverso l'uso di collanti naturali a base di amido.

Il materiale base è la carta, derivata dalla lavorazione della fibra di legno. A sua volta, quest'ultima è ricavata a partire dagli scarti prodotti dalle segherie, che utilizzano le parti di pregio dei tronchi, oppure dal materiale di risulta dalle operazioni di sfoltimento delle foreste. Una volta eliminata la corteccia, la parte interna del legno viene lavorata e attivata (coloranti, stabilizzanti, ecc.) per ottenere paste di diversa tipologia e proprietà, sia meccaniche che estetiche, variabili a seconda dei campi di impiego previsti. Il materiale semi-lavorato, ovvero i fogli di carta, sono ottenuti separando la fibra dall'elevata percentuale di acqua presente nella pasta (circa il 90%), dapprima facendo depositare la fibra su tele e

Fig.50 - Struttura in sezione del cartone ondulato

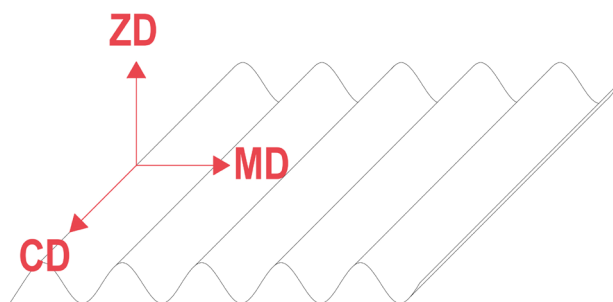
1. Comieco: Consorzio nazionale per il recupero e il riciclo degli imballaggi a base cellulosa (<https://www.comieco.org/>)

poi facendo scorrere i fogli all'interno di presse in acciaio. La carta che si ottiene è un materiale con una composizione di tipo fibroso, che ne determina il comportamento meccanico anisotropo.

A partire dalla carta, il cartone ondulato si ottiene combinando due fogli tesi che vengono distanziati da un foglio di carta ondulata, a cui vengono uniti mediante colle; la struttura che si ottiene è detta "a onda semplice", e può essere ulteriormente composta sovrapponendo un ulteriore foglio teso, distanziato da quello precedente tramite un foglio ondulato. La progressione consente di ottenere fogli di cartone più complessi, detti "a doppia onda" (tre fogli tesi e due fogli ondulati) o a "tripla onda" (quattro fogli tesi e tre fogli ondulati). I cartoni a onda semplice o doppia sono quelli di più largo consumo, e vengono utilizzati nei settori degli imballaggi e trasporti; quelli a tripla onda hanno invece una limitata diffusione, (circa il 4% della produzione nazionale), e sono impiegati nel settore dei trasporti in sostituzione del legno o nel settore chimico. Le proprietà di resistenza del cartone vengono definite nelle tre direzioni (Fig.51):

- *Machine Direction* (MD): direzione perpendicolare all'onda;
- *Cross Direction* (CD): direzione parallela all'onda;
- *Thickness Direction* (TD): direzione dello spessore dell'onda.

Fig.51 - Sistema di riferimento per la definizione delle caratteristiche di resistenza del cartone ondulato (Credits: Elaborazione personale)



All'interno della struttura del cartone ondulato (Fig.51), ciascuno strato ha funzioni diverse, e la tipologia di carta impiegata varia a seconda del tipo di proprietà richieste. La prima macro-distinzione delle carte utilizzate riguarda la posizione all'interno della struttura in cartone:

- a. Copertine.** Rappresentano lo strato esterno ed hanno il compito di resistere alle sollecitazioni assiali di compressione nella direzione dell'onda (CD) e a quelle ortogonali nella direzione dello spessore (TD). Allo stesso tempo, la carta utilizzata per le copertine deve assicurare un'opportuna durabilità e integrità rispetto alle azioni esterne (umidità², attacchi chimici, ecc.);
- b. Fogli tesi.** Sono le superfici piane frapposte alle ondulazioni, sollecitate dalle spinte di trazione provocate dalla naturale tendenza delle onde ad allontanarsi. La carta impiegata per i fogli tesi deve avere una porosità tale da consentire al collante di penetrare e rendere solidale l'accoppiamento con le ondulazioni;
- c. Ondulazioni.** Costituiscono l'elemento distanziatore tra i fogli tesi e sono realizzate attraverso la piegatura di fogli tesi attraverso procedimenti meccanici. Da un punto di vista della resistenza, le ondulazioni incrementano notevolmente le prestazioni del fo-

2. Le molecole di acqua presenti nell'aria dissolvono i legami a idrogeno che si instaurano tra le fibre, diminuendo, fino a rendere nulle, le prestazioni di resistenza meccanica della carta.

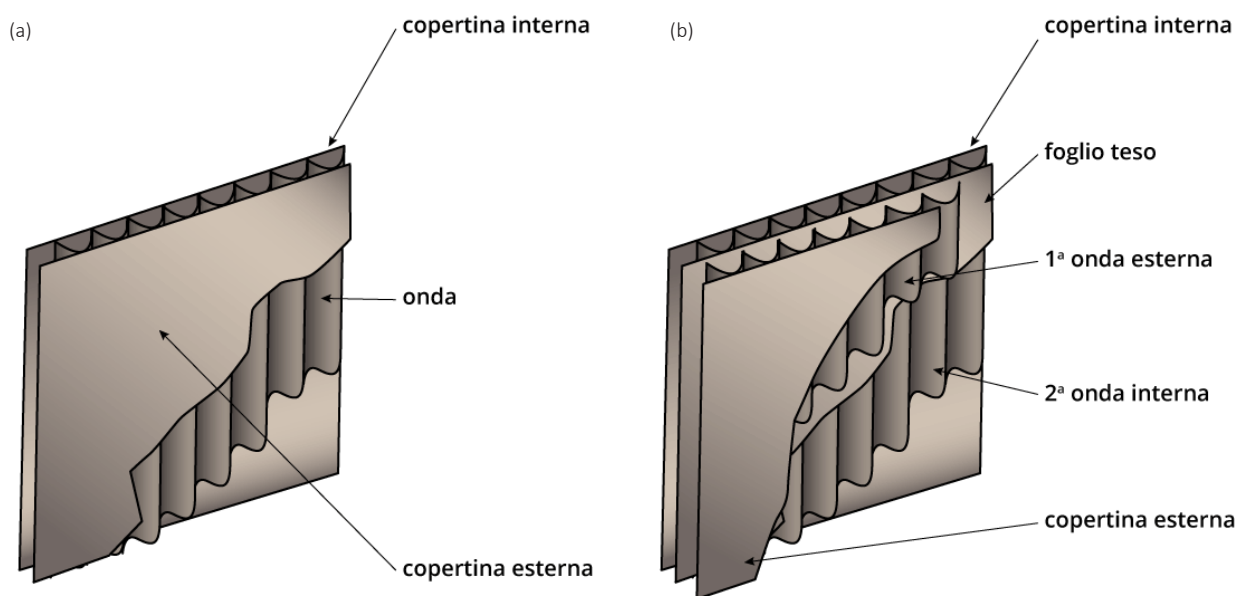


Fig.52 - Esempificazione della struttura del cartone ondulato a onda semplice (a) e a doppia onda (b)
(Credits: © Adaptive Group Srl da adaptivepack.it)

glio di cartone, aumentandone la rigidezza flessionale e la resistenza a compressione. I parametri su cui si basa la classificazione delle ondulazioni sono:

- Altezza: distanza tra la cresta e la base dell'onda, misurata in millimetri;
- Passo: distanza tra due creste consecutive, misurata in millimetri;
- Numero: quantità di onde per metro lineare;
- Coefficiente di ondulazione: rapporto tra la lunghezza del foglio di carta iniziale e quella finale del foglio ondulato, che fornisce l'indicazione rispetto al consumo di carta impiegata.

Il cartone si realizza dalla combinazione di diverse tipologie di onda, e si distinguono:

- Onde alte (A e K), con altezza superiore a 4.5 mm;
- Onde medie (C), con altezza compresa tra 3.5 e 4.4 mm;
- Onde basse (B), con altezza compresa tra 2.5 e 3.4 mm;
- Micro onde (E, F e G), con altezza inferiore a 2.4 mm.

Le tipologie di carte impiegate per le copertine (a) e i fogli tesi (b) sono:

- **Kraft (K), Kraft bianco (Kb):** dal tedesco "forza", sono carte ad alta resistenza, prodotte con l'aggiunta di solfato di sodio, e hanno un contenuto minimo di cellulosa dell'80%. Nei paesi come l'Italia, che hanno una ridotta produzione di cellulosa, le carte Kraft possono essere prodotte anche attraverso l'utilizzo di materie prime da fonti di recupero, che devono comunque essere selezionate tra quelle con le medesime caratteristiche di resistenza. Le carte Kraft bianco (Kb), come per le altre tipologie, sono invece ottenute per successivo processo di cosiddetta "sbianca" delle carte Kraft (K), dal quale è possibile avere paste con un grado di bianco compreso tra l'85 e il 90%;
- **Liner (L), Liner bianco (Lb):** sono carte con buone caratteristiche meccaniche, prodotte attraverso materie fibrose ottenute dalla carta riciclata. Questa è composta in percentuali variabili da carta da macero che, a sua volta, è distinta in gruppi secondo la qualità, la presenza di composti estranei alle fibre ed eventuali processi chimici subiti. La classificazione delle carte da macero è attualmente definita dalla norma UNI EN 643-2014, che individua cinque classi per la carta e cartone di riciclo (Gruppo 1, 2, 3, 4 e 5, con qualità crescente) utilizzati per la ri-mani-

fattura di prodotti nell'industria cartaria, introducendo la novità, rispetto alla precedente UNI EN 643-1995, delle tolleranze massime di materiali estranei presenti nel macero.

- **Test liner (T), Test liner bianco (Tb):** sono carte simili alle Liner (L), ottenute però con carta da macero di minore qualità (quindi con una classificazione di gruppo inferiore secondo la UNI EN 643-2014) e perciò caratterizzate da prestazioni inferiori rispetto alle precedenti;
- **Camoscio (C), Camoscio bianco (Cb):** vengono prodotte impiegando pasta proveniente da carta di recupero da macero non selezionato, di cui non si conosce la provenienza e la composizione, e perciò non presentano prestazioni meccaniche di particolare pregio. Tale caratteristica le rende adatte all'uso come fogli tesi all'interno del cartone.

Le tipologie di carte impiegate per le ondulazioni (c) sono invece:

- **Semichimica (S):** si tratta di carte prodotte con il 20-30% di fibre ricavate da macero selezionato di buona qualità e il restante con pasta semichimica di latifoglia, che presentano buone caratteristiche di resistenza meccanica;
- **Medium (M):** vengono prodotte impiegando solo fibre di carta recuperata, a cui viene aggiunto dell'amido per aumentare la resistenza meccanica finale;
- **Fluting (F):** sono carte realizzate utilizzando soltanto macero di bassa qualità (Gruppo 1 UNI EN 643-2014), e per questo presentano scarsi livelli di resistenza e di pregio;
- **Paglia (P):** prodotte impiegando pasta semichimica di paglia, presentano limitate prestazioni meccaniche e il loro uso nella produzione del cartone ondulato risulta sempre più raro;
- **Uso semichimica (US):** sono prodotte impiegando una miscela di macero che subisce un trattamento di pressaggio finalizzato ad aumentare le prestazioni meccaniche del prodotto finale.

Il cartone ondulato come prodotto finale può assumere caratteristiche e prestazioni variabili in base al tipo di carta e alla combinazione di ondulazioni, selezionate in accordo alle prestazioni richieste. Per individuare la caratterizzazione del prodotto finito, ciascuna tipologia di cartone è contraddistinta da una sequenza alfanumerica, ordinata secondo la progressione dei diversi fogli (tesi e ondulati) dalla copertina esterna a quella interna, suddivisa in tre macro-categorie di informazioni: (1) insieme alfabetico ordinato dei diversi tipi di carte impiegate, (2) insieme ordinato delle classi di carte impiegate, (3) insieme numerico ordinato dei tipi di onda utilizzati. A seconda degli usi previsti e delle esigenze da soddisfare, le copertine esterne possono subire ulteriori trattamenti per aumentarne la resistenza e la durabilità, in modo particolare rispetto agli agenti atmosferici (acqua, umidità) e agli attacchi di sostanze chimiche (Piero, 1999; Emanuele, 2007; Cepi ContainerBoard, 2014).

4.3. Sostenibilità e impatto ambientale del ciclo di vita del cartone

Nell'introdurre il tema dell'utilizzo del cartone come materiale costruttivo, ne sono state descritte le intrinseche caratteristiche di eco-compatibilità e circolarità del ciclo di vita. Tale riflessione è stata giustificata, in prima istanza, in considerazione del tipo di risorse utilizzate per la sua produzione, che vengono prioritariamente approvvigionate da fonti rinnovabili e/o provenienti da riciclo. In secondo luogo, la possibilità di riciclare e/o riutilizzare il cartone al termine del suo ciclo di uso consente di reimmettere le risorse in altre catene di produzione di valore, preservando di conseguenza l'energia accumulata durante la produzione. Tuttavia, è fondamentale considerare che tali fattori non rappresentano gli unici elementi che concorrono alla definizione della sostenibilità di una tecnologia costruttiva. Come tutti i prodotti, anche quelli edili (elementi e componenti costruttivi) devono essere valutati nei loro potenziali di impatto lungo tutte le fasi del ciclo di vita, nello specifico considerandone le prestazioni durante l'uso e gestione degli edifici per assicurarsi che posseggano performance energetiche – contenimento delle dispersioni e isolamento termico, isolamento acustico, ecc. – tali da fornire appropriati livelli di comfort e il contenimento delle dispersioni. Da queste premesse, e vista la coerenza di verificare tali prestazioni per l'edilizia pubblica, si è reso necessario approfondire, attraverso l'analisi della letteratura scientifica, alcuni aspetti in merito all'effettivo impatto economico-ambientale che il ciclo di vita del cartone produce nella realizzazione di opere edili. Questo con l'obiettivo di operare una verifica preliminare circa la rispondenza del cartone ai requisiti prestazionali richiamati normativa di settore, interpretata in Italia dal Decreto CAM.

A questo proposito, si sono presi a riferimento i risultati di uno studio condotto nel 2017 presso la Technical University of Delft (Olanda) che, attraverso un approccio olistico alla valutazione dell'impatto ambientale del ciclo di vita del cartone, ne ha individuato potenziali e limiti per l'uso come materiale da costruzione. L'indagine ha preso in considerazione cinque macro-aree di valutazione della sostenibilità economico-ambientale del cartone, corrispondenti alle diverse fasi del ciclo di vita, ovvero: (1) risorse, (2) riciclabilità, (3) consumi energetici per la produzione, *embodied e operational energy*³, (4) durabilità e manutenzione, e (5) potenziali di emissioni e inquinamento di suolo, aria e acqua.

Per quanto riguarda le **risorse** (1), come già analizzato al capitolo precedente, la materia prima impiegata per la produzione del cartone è la pasta di carta, ottenuta dalle fibre di legno vergini provenienti dagli scarti delle segherie, o dal riciclo della carta da macero opportunamente selezionata. La sostenibilità del ciclo di vita del materiale si lega dunque inizialmente alla gestione delle foreste, che deve essere condotta in accordo a protocolli internazionali di certificazione che ne attestano la qualità e lo sfruttamento consapevole (FSC, SFM). Un obiettivo che l'Europa ha progressivamente trapiantato arrivando, nel 2018, ad una percentuale dell'82% di materie lignee ricavate da foreste a gestione sostenibile. A partire dalle materie prime, si deve considerare che il processo di lavorazione per realizzare la carta ri-

3. Per *operational energy* si intende l'energia richiesta da un edificio durante il suo ciclo di vita utile, necessaria a garantirne il corretto funzionamento, che si associa ai sistemi di impianto quali illuminazione artificiale, riscaldamento e raffrescamento, ventilazione meccanica, ecc.

chiede ingenti quantitativi di acqua, che però viene efficacemente recuperata, riutilizzata o reimpressa in ambiente. A questo proposito, la Confederation of European Paper Industries (CEPI) stima che l'acqua restituita dalla produzione della carta arrivi fino al 93% di quella utilizzata durante la lavorazione delle fibre (Cepi, 2019).

Rispetto alla **riciclabilità** (2) del materiale, il cartone dimostra di poter essere reimpresso ciclicamente nel processo di produzione di semilavorati (Fig.53). La lavorazione richiede la selezione e pulitura del macero, oltre che l'eventuale aggiunta di percentuali di fibra vergine, variabili a seconda della qualità di carta richiesta. Dai riferimenti analizzati si dimostra che l'utilizzo di materia riciclata permette di ridurre fino a un sesto il fabbisogno energetico della produzione, fino al 25% le emissioni prodotte e di dimezzare il quantitativo di acqua richiesta. Un aspetto critico da considerare nel processo di riciclo della carta riguarda il *down-cycling*, ovvero la perdita progressiva di prestazione per ogni ciclo di riutilizzo della fibra. Alcuni studi hanno stimato che il cartone può essere riciclato per circa 5-6 volte senza richiedere l'aggiunta di materia vergine; attualmente in Europa, ogni fibra di cartone è riciclata in media 3.6 volte per anno, con un tasso cumulativo di riciclo del 72.3% (+14.7% rispetto alla media mondiale) (Cepi, 2019; Latka, 2017). Un ulteriore elemento di criticità risiede nel fatto che i trattamenti necessari ad assicurare la durabilità del cartone (resistenza all'acqua, al fuoco, ecc.) possono rendere difficoltoso, o non economicamente conveniente, il riciclo del materiale. In fase di progetto, ciò richiede l'approfondimento di opportune modalità di protezione dei componenti, in grado contemporaneamente di preservare l'integrità e di mantenerne inalterati i potenziali di circolarità.

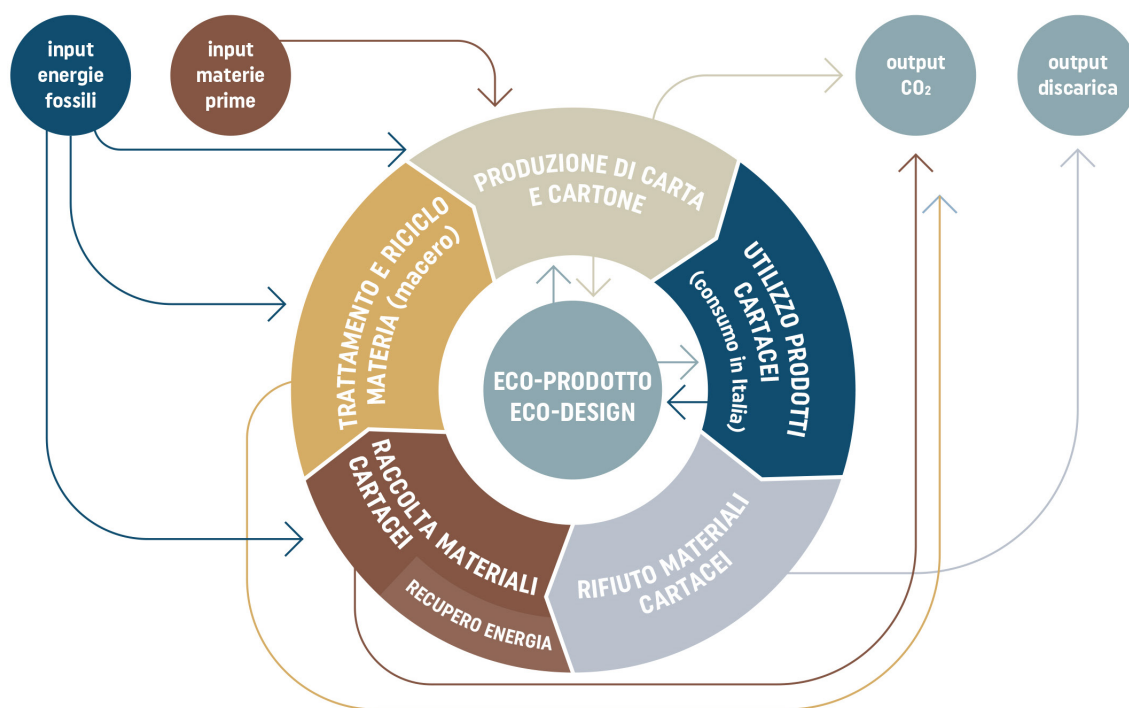


Fig.53 - Schema di gestione circolare della filiera delle risorse cartarie (Credits: © Comieco da www.comieco.org)

Con riferimento agli **aspetti energetici** (3) e ai **potenziali di emissione** (5) della produzione del cartone, si rileva che il processo richiede una elevata intensità energetica; tuttavia, durante il processo di cottura, le componenti chimiche possono essere recuperate producendo energia, rendendo di fatto la lavorazione energeticamente autosufficiente o addirittura in grado di produrre un surplus energetico. Inoltre, nel corso degli ultimi decenni i processi di lavorazione della carta hanno subito un progressivo efficientamento attraverso la transizione a combustibili da biomasse e investimenti in tecnologie innovative, arrivando a dimezzare i volumi di emissioni dal 1990 ad oggi (Fig.54). Si deve inoltre osservare che i consumi energetici associati alla produzione del cartone possono essere ulteriormente ridotti ricorrendo a materie prime di riciclo, ovvero conservando l'*embodied energy* trattenuta nel materiale dismesso. Considerando l'intero processo edilizio, la riduzione del fabbisogno energetico associato alle tecnologie in cartone è ulteriormente resa possibile dalle elevate prestazioni di isolamento termico del materiale, che contribuiscono a ridurre le dispersioni durante la fase di uso e gestione degli edifici. A questo proposito, uno studio condotto presso la Oxford Brookes University (UK) ha dimostrato come un edificio realizzato in cartone presenti prestazioni termiche di involucro nettamente superiori rispetto a tecnologie tradizionali, come per esempio il laterizio, con una conseguente riduzione del fabbisogno energetico e delle emissioni in fase di uso degli edifici. Questo contribuisce ad un sostanziale abbattimento dell'energia consumata globalmente dal processo edilizio, e la stessa ricerca ha calcolato che, in soli tre anni, il risparmio energetico di un edificio in cartone riesce a bilanciare quella richiesta dalla produzione del materiale (Vaccari e Sassi, 2015).

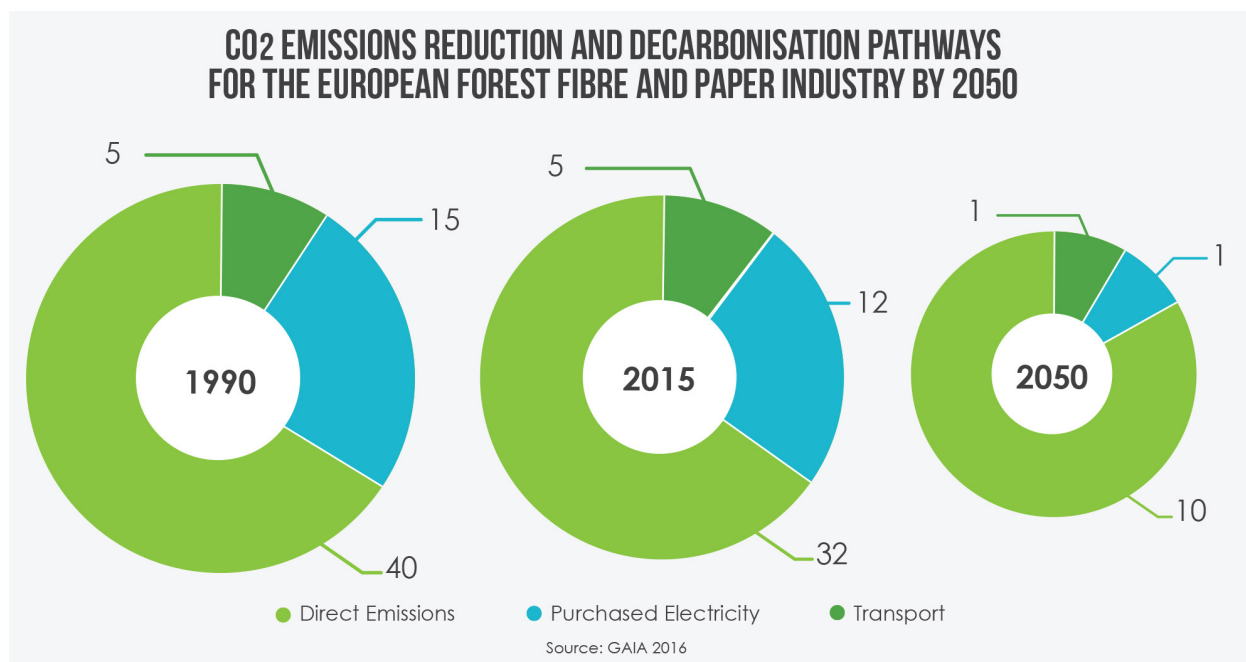


Fig.54 - Il settore cartario ha progressivamente migliorato la propria efficienza energetica e ridotto la produzione di emissioni nel periodo (1990-2015); un ulteriore efficientamento è previsto secondo le stime al 2050 (Credits: © Cepi da Cepi (2019), *Sustainability Report* [Online] Available at: https://sustainability.cepi.org/wp-content/uploads/2018/10/CEPI_Sustainability_report_full_update.pdf (Accessed: 5th January 2022))

Infine, per quanto attiene alla **durabilità** (4), si rileva che le tecnologie edilizie basate sul cartone non hanno ancora sviluppato una maturità tale da consentire una validazione rispetto al ciclo di vita utile dei componenti costruttivi. Tuttavia, dall'analisi di alcune esperienze progettuali, approfondite al capitolo successivo, è possibile osservare come molti edifici realizzati con componenti costruttivi in cartone hanno assicurato un tempo di vita utile variabile tra i dieci e i venti anni, reso possibile grazie all'utilizzo di trattamenti e accorgimenti tecnici specifici che proteggessero il materiale dagli agenti esterni, rispetto ai quali il cartone risulta sensibile.

L'indagine della letteratura scientifica conferma le caratteristiche di sostenibilità del cartone quale materiale costruttivo nei diversi aspetti che riguardano il ciclo di vita delle opere edili, dalla produzione dei componenti, fino alla messa in opera e gestione dei manufatti. L'analisi delle modalità di approvvigionamento del materiale ne testimonia l'intrinseca compatibilità ambientale; nella fase di successiva lavorazione e produzione di semilavorati, i consumi energetici risultano globalmente inferiori rispetto a processi di lavorazione del legno, dell'acciaio o del calcestruzzo. Il fabbisogno di energia e i potenziali di emissione sono ulteriormente ridotti durante le fasi di uso e gestione dei manufatti grazie alle elevate prestazioni di isolamento dei componenti di involucro. Inoltre, l'uso del cartone può contribuire a traguardare gli obiettivi di circolarità dei prodotti edilizi, sfruttando risorse di post-consumo e reimmettendo nei flussi di materia l'energia accumulata durante la produzione. Un aspetto di criticità si rileva nella durabilità del materiale, un tema ancora scarsamente indagato dalla letteratura scientifica; vista la mancanza di riferimenti in questo senso, il capitolo successivo ha approfondito tale aspetto ricorrendo alla ricognizione delle esperienze di realizzazione di prototipi ed edifici utilizzando il cartone come materiale costruttivo.

4.4. L'utilizzo del cartone come materiale costruttivo: esperienze, limiti e potenzialità

Gli usi del cartone nel settore delle costruzioni rappresentano il 4.5% dell'intera produzione europea (4.1 MT annuali nel 2018). Appartengono a questa percentuale una varietà di utilizzi per i quali trovano applicazione i materiali a base di carta: realizzazione di semilavorati come impasti, pannelli di isolamento termico, casseri, sacchi per gli imballaggi, supporti per la produzione di membrane protettive impermeabilizzanti (cartone bitumato). Parallelamente a questi settori, negli ultimi anni l'uso del cartone è stato anche oggetto di una serie di sperimentazioni volte a testarne e verificarne l'applicabilità nella realizzazione di componenti strutturali, in particolare per quelle applicazioni di uso connotate da una spiccata transitorietà.

I maggiori riferimenti sull'uso del cartone come materiale costruttivo vengono dall'esperienza dell'architetto giapponese **Shigeru Ban (1957) e del gruppo Voluntary Architects Network (VAN)** da lui fondato, maturata in particolare modo nell'ambito emergenziale post-disastro. Negli ultimi venti anni, la ricerca di Ban si è concentrata sull'utilizzo di elementi costruttivi in cartone per la realizzazione di *shelter* di prima emergenza. Il sistema tecnologico di riferimento è il **Paper partition system**, un telaio realizzato con tubolari in cartone, incastrati e connessi tramite piastre, nastro adesivo o corde, che permettono di allestire unità spaziali minime per accogliere la popolazione sfollata a seguito di calamità naturali all'interno di edifici collettivi come palestre o auditorium (Fig.55). Data l'estrema facilità di assemblaggio, il sistema può essere messo in opera anche in auto-costruzione, e risulta funzionale a garantire gli essenziali livelli di privacy all'interno dei grandi ambienti in cui viene accolta la popolazione nelle fasi immediatamente successive al disastro. I tubolari in cartone definiscono infatti un reticolo di unità spaziali ripetibili⁴ schermate da teli leggeri in carta o tessuto, in cui vengono predisposti gli arredi per il pernottamento della popolazione colpita. Il Paper partition system è stato impiegato per la prima volta a seguito del terremoto di Fujisawa in Giappone nel 2006, e successivamente



Fig.55 - Paper Partition System per l'emergenza post-sisma installato nel palazzetto dello sport di Hitoyoshi, nella prefettura di Kumamoto (Shigeru Ban Architects/VAN, 2020) (Credits: © Voluntary Architects Network da <http://www.shigerubanarchitects.com/>)



Fig.56 - Paper Partition System utilizzato per l'allestimento del centro vaccinale Covid-19 a Komatsu, Ishikawa (Shigeru Ban Architects/VAN, 2021) (Credits: © Voluntary Architects Network da <http://www.shigerubanarchitects.com/>)

riproposto e implementato, tra gli altri casi, nel 2011 dopo il sisma dell'East Japan, nel 2014 e 2018 ad Hiroshima ed Hokkaido, così come a Camerino in Italia (2016).

Più recentemente, lo stesso sistema è stato anche utilizzato per la gestione dell'emergenza sanitaria legata alla pandemia del virus Covid-19, nello specifico nella città di Komatsu (Ishikawa), dove nel febbraio 2021 il gruppo VAN ha provveduto alla realizzazione di un hub vaccinale attraverso l'uso dello stesso sistema tecnologico in cartone (Fig.56). A partire dagli shelter di prima assistenza, la ricerca sperimentale di Shigeru Ban sul cartone si è successivamente ampliata fino a prevedere la realizzazione di edifici per usi di medio-lungo termine e con funzioni di carattere collettivo e/o sociale. Rientrano in questa linea di esperienze i modelli delle **Paper Log Houses** realizzati in India e Turchia nel 2000-2001, ovvero edifici con strutture portanti continue realizzate in tubi di cartone, che a loro volta si impostano su un basamento realizzato con casse di recupero da imballaggi di generi alimentari. Nell'ambito dell'edilizia scolastica, il gruppo VAN ha implementato il modello delle Paper Log Houses anche per la realizzazione di aule didattiche emergenziali post-disastro. Un esempio è quello della scuola di infanzia Miao Miao nella città di Taiping (Sichuan) costruita nel 2013, a seguito del terremoto di Ya'an, impiegando una struttura a telaio costituita di tubi cavi in cartone che hanno permesso di assemblare il nuovo edificio in pochi giorni da parte di operatori e studenti volontari (Fig.57). L'esperienza dello studio di Ban ha progressivamente approfondito l'utilizzabilità del cartone fino alla realizzazione di grandi opere ad uso della comunità. Il culmine di questo percorso è stato raggiunto con i tre progetti del **Paper Temporary Studio** (2004), un padiglione per uffici installato sulla copertura del Pompidou

4. Il modulo base è 180x180 cm.



Fig.57 - Paper Log System utilizzato per la realizzazione della Miao Miao Nursery School per l'emergenza post-terremoto a Ya'an City, Sichuan, Cina (Shigeru Ban Architects/VAN, 2013) (Credits: © Voluntary Architects Network da <http://www.shigerubanarchitects.com/>)

Center di Parigi, coperto da una volta realizzata con tubolari cavi in cartone, la **Cardboard Cathedral** (Christchurch, New Zealand, 2013), una chiesa realizzata con una struttura in elementi prefabbricati in cartone e la **Paper Concert Hall** a L'Aquila del 2009, una sala da concerti inizialmente pensata per essere dismessa dopo pochi anni e ancora oggi in uso per volere della stessa comunità aquilana. In particolare gli ultimi due edifici hanno rappresentato non solo un caso pilota per testare l'utilizzabilità delle strutture in cartone per edifici di grandi dimensioni, ma anche per verificare la durabilità del materiale per manufatti di con cicli di utilizzo di medio-lungo termine (> 5 anni) (VAN, 2010).

Le prestazioni inerenti alla sostenibilità ambientale del cartone sono state poste al centro anche del concept progettuale della **Cardboard House**, realizzata nel 2004 dallo studio australiano Stutchbury and Pape in collaborazione con l'Ian Buchan Fell Housing Research Unit della University of Sydney (Fig.58). Si tratta di una unità abitativa minima che è stata realizzata con portali in cartone ondulato, trasportati in versione *flat-packed* e installati in sito sole sei ore da due operatori. L'unità è stata progettata con l'intento di promuovere un modello abitativo ad elevata prefabbricazione e industrializzazione, contemporaneamente in grado, grazie ad un uso consapevole delle risorse materiali, di ridurre i costi di realizzazione e gli impatti ambientali associati alla costruzione. Il materiale impiegato per la costruzione proviene all'85% da fonti di riciclo, e risulta completamente riciclabile al termine dell'uso. La riciclabilità è stata resa possibile anche grazie all'uso di limitati elementi di giunzione e modalità di connessione reversibili, come nastri in velcro e ancoraggi in materiale plastico. Il gruppo di ricerca ha stimato che la reimmissione del materiale in altri cicli di produzione consentirebbe una riduzione di circa 12 metri cubi di rifiuti altrimenti conferiti in discarica, ovvero di risparmiare il taglio di 39 alberi e 30.000 litri di acqua. Durante la fase di uso e gestione, l'unità è stata resa autosufficiente dal punto di vista energetico e dell'uso dell'acqua, quest'ultima raccolta e stoccata in taniche sotto il solaio di calpestio contro-terra e utilizzata per i servizi integrati nell'unità. La durabilità del cartone è stata assicurata dall'integrazione di una doppia-pelle esterna in materiale plastico impermeabile, che ha impedito agli agenti atmosferici di penetrare pur mantenendo la traspirabilità della struttura sottostante, evitando accumuli di umidità che ne avrebbero compromesso le prestazioni meccaniche (5osA, 2008).



Fig.58 - Carboard House in mostra presso la House of the Future Exhibition a Sydney (Stutchbury&Pape in collaborazione con Ian Buchan Fell Housing Research Unit, 2004) (Credits: Peter Stutchbury da www.peterstutchbury.com.au)

In ambito europeo, uno dei primi esempi di uso di strutture in cartone è stato sviluppato nel contesto dell'edilizia scolastica, ovvero la **Westborough Primary School** (2001), già analizzata tra i casi studio (Cfr. **Pt. I, Cap. 3.3**) (Fig.59). Si tratta di un modello di aula realizzato attraverso una struttura di tubolari in cartone riciclato, che dimostra come il cartone possa costituire un'alternativa sostenibile ed eco-compatibile ai materiali da costruzione tradizionali nel campo delle strutture emergenziali. Circa il 90% del materiale impiegato è stato approvvigionato da fonti di riciclo da parte degli studenti e dalle loro famiglie, promuovendo un ridotto impatto economico e ambientale del ciclo di vita del manufatto. Inoltre, il progetto dell'aula della Westborough Primary School, analogamente agli edifici comunitari di Shigeru Ban, ha fornito un precedente per testare la durabilità del cartone per strutture con tempi di uso prolungati; l'aula infatti è stata appositamente progettata per garantire un ciclo di vita utile di circa 20 anni, durante i quali i componenti strutturali in cartone, opportunamente protetti e schermati, hanno dimostrato di mantenere la propria integrità anche a fronte di condizioni climatiche avverse (Cottrell e Vermeulen, n.d.; Rogora, 2006).



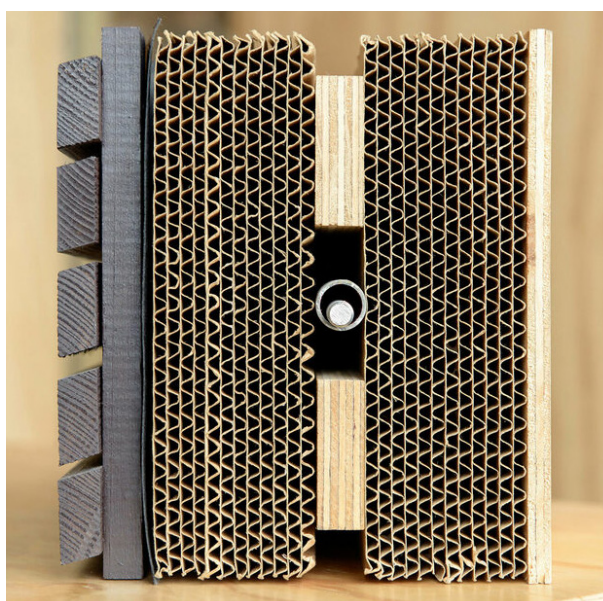
Fig.59 - Westborough Cardboard School, UK (Cottrell and Vermeulen, 2001) (Credits: © Peter Grant da www.cv-arch.co.uk/)

Nel 2014, presso la Technische Universität Darmstadt (Germania) è stato avviato il progetto **BAMP (Bauen mit Papier, Building with Paper)** con l'obiettivo di sviluppare ricerche intersettoriali per testare l'utilizzo del cartone nel settore delle costruzioni. Il consorzio di ricerca, formato da ricercatori e partner pubblici e privati, svolge ricerche alle diverse scale di approfondimento, dalle prove sul materiale ai processi di lavorazione, fino alla sperimentazione su archetipi e soluzioni costruttive. Dal contesto di tali esperienze è stato sviluppato il progetto di BAMP House, un modello di unità abitativa minima da utilizzare come *shelter* di prima emergenza. Il progetto è stato sviluppato fino alla realizzazione di due prototipi, il primo costruito con elementi lineari tubolari e il secondo utilizzando telai piani bidimensionali in cartone alveolare. I due prototipi sono serviti per testare le prestazioni di resistenza meccanica del materiale e per sperimentare modalità di connessione dei giunti reversibili (TU Darmstadt, 2014).

In Olanda, l'azienda **Fiction Factory** ha sperimentato l'uso del cartone nella realizzazione di unità abitative modulari, che sfruttano le caratteristiche di leggerezza e facilità di assemblaggio del materiale per rispondere alle esigenze di spostamento e ricollocabilità dell'offerta abitativa. Il modello base dell'unità è aggregabile ed espandibile attraverso la giustapposizione di una serie di telai composti da 24 strati di cartone ondulato, piegati e resi solidali attraverso l'uso di colle ecologiche, che vengono successivamente ancorati ad una struttura a scheletro in legno. La chiusura che si ottiene presenta elevate caratteristiche di isolamento termico e, una volta protetta da rivestimenti impermeabili e traspiranti, è in grado di assicurare un tempo di vita utile fino a cinquanta anni. Grazie alla leggerezza della struttura, l'unità può essere trasportata e ricollocata più volte a seconda delle necessità di spostamento degli utenti e, al termine dell'uso, tutti i componenti possono essere disassemblati e riciclati, reimmettendo il materiale base all'interno della medesima filiera di produzione (Fiction Factory, n.d.) (Fig.60).



(a)



(b)



(c)

Fig.60 - Wickelhouse (Fictionfactory): modello abitativo (a), stratigrafia dei componenti di chiusura (b) e fasi di installazione in opera (c)
(Credits: © Wickelhouse/Yvonne Witte da www.stylepark.com)

Sempre in Olanda, nel 2017 una ricerca condotta presso la Technical University of Delft ha portato allo sviluppo del prototipo **TECH, Temporary Emergency Cardboard House**, un modello di unità abitativa di prima emergenza realizzata impiegando pannelli in cartone con funzione strutturale portante. In particolare, gli esiti della ricerca hanno non solo permesso di verificare gli aspetti relativi alla semplicità e rapidità di installazione, testati attraverso la realizzazione di alcuni prototipi in scala, ma anche di dimostrare le elevate prestazioni termo-igrometriche, e perciò di comfort per l'utenza, ottenibili attraverso l'uso di componenti di chiusura verticale e orizzontale con struttura cava in cartone ondulato (Latka, 2017).

In Italia, uno dei primi esempi di impiego del cartone come materiale costruttivo è stato il prototipo della Cartonhouse (2009), progettata da 2PStudio di Paolo Pelosi in collaborazione con l'architetto Samir El-Tawil. Si tratta di un modello di unità abitativa costruita attraverso un sistema di elementi aggregabili e modulari in cartone ondulato, che realizza un sistema tecnologico, attualmente brevettato, impiegabile anche per la creazione di elementi di arredo. Di particolare interesse risulta la strategia impiegata per preservare la circolarità del materiale, dal momento che le connessioni tra gli elementi costruttivi avvengono attraverso sistemi a incastro ed elementi assemblati a secco, che abilitano la possibilità di smontaggio e dismissione selettiva degli elementi strutturali dell'unità al termine dell'uso (Comieco, 2012).

Negli stessi anni, la ricerca sull'utilizzo del cartone nel settore delle costruzioni è stata portata avanti anche in contesti accademici, in particolare presso l'Università di Ferrara nell'ambito di alcuni corsi tenuti dall'architetto **Mario Cucinella (1960)**. Una delle principali esperienze sviluppate è stata quella di un workshop di autocostruzione tenuto contestualmente al Laboratorio di Costruzione di cui Cucinella era docente, che ha previsto la realizzazione di alcuni padiglioni espositivi da parte degli studenti ferraresi. Tali manufatti sono stati infatti realizzati utilizzando tubi cavi in cartone ondulato come struttura portante, successivamente protetti dagli agenti atmosferici attraverso teli plastici tensionati al di sopra degli elementi in cartone. Proprio per la sua natura didattica, il processo sviluppato da Cucinella dimostra la vocazione delle tecnologie basate sul cartone ad attivare processi di auto-costruzione, resi possibili dalla semplicità e rapidità di installazione dei componenti, caratteristiche essenziali ad assicurare una risposta rapida ed efficace in contingenze di natura emergenziale (Rogora, 2006).

Più recentemente, gli stessi principi sono stati ripresi e testati nell'ambito di due esperienze progettuali di Archicart®, un marchio dell'azienda AREA S.r.l. (Catania). La prima è stata sviluppata nel 2018 con l'installazione di **T-Box**, un prototipo di unità abitativa con struttura in pannelli prefabbricati in cartone (pannelli **PACOTEC™ Stre-wall**) (Fig.61). La realizzazione è stata portata avanti nell'ambito di un workshop di autocostruzione che ha visto la partecipazione attiva di circa 30 studenti dell'Università di Catania, coadiuvati da professori e tecnici dell'azienda, che sono stati coinvolti nella produzione *off-site* e successiva installazione dei pannelli prefabbricati. Il prototipo, nella sua fase realizzativa, ha permesso di validare le caratteristiche di semplicità, rapidità e auto-costruibilità del modulo, prestazioni ottenibili in virtù dell'elevata leggerezza dei componenti e del numero ridotto di connessioni e operazioni di assemblaggio. Una volta installata, la T-Box è stata per un anno oggetto di monitoraggio, al fine di verificare gli aspetti di comfort indoor legati all'isolamento e inerzia termica dell'involucro, alle prestazioni acustiche e alla qualità dell'aria. Tali monitoraggi hanno permesso di validare la tecnologia rispetto agli obiettivi individuati di comfort per l'utenza, rapida assemblabilità – propedeutica all'intervento in condizioni emergenziali – e reversibilità dell'intervento. Rispetto a quest'ultimo, l'unità T-Box è stata dismessa nel 2020 e i componenti sono stati stoccati per la successiva reinstallazione. Il sito su cui sorgeva la T-Box è stato totalmente ripristinato e reso fruibile nelle condizioni originarie. Lo smontaggio dei pannelli

ha permesso inoltre di verificare il mantenimento della loro integrità strutturale anche a seguito dell'esposizione alle condizioni climatiche esterne, in particolare pioggia e neve.

Un secondo modello di unità, analoga alla precedente seppur implementata in alcuni aspetti tecnico-costruttivi, è stato installato nel dicembre 2020 presso l'Università di Corsica Pasquale Paoli (Corte, FR) come parte di un programma di implementazione delle strutture di ospitalità del campus universitario (Fig.62). L'esperienza diretta sul campo, sviluppata partecipando alcuni giorni al cantiere di realizzazione dell'unità, ha permesso di osservare come



Fig.61 - Prototipo T-Box installato presso l'Università di Catania (Dario Distefano/Archicart® 2018-2020) (Credits: © Archicart®)



Fig.62 - Unità abitativa T-Box installata presso l'Università Paoli a Corte, Corsica (Archicart® 2020) (Credits: © Archicart®)

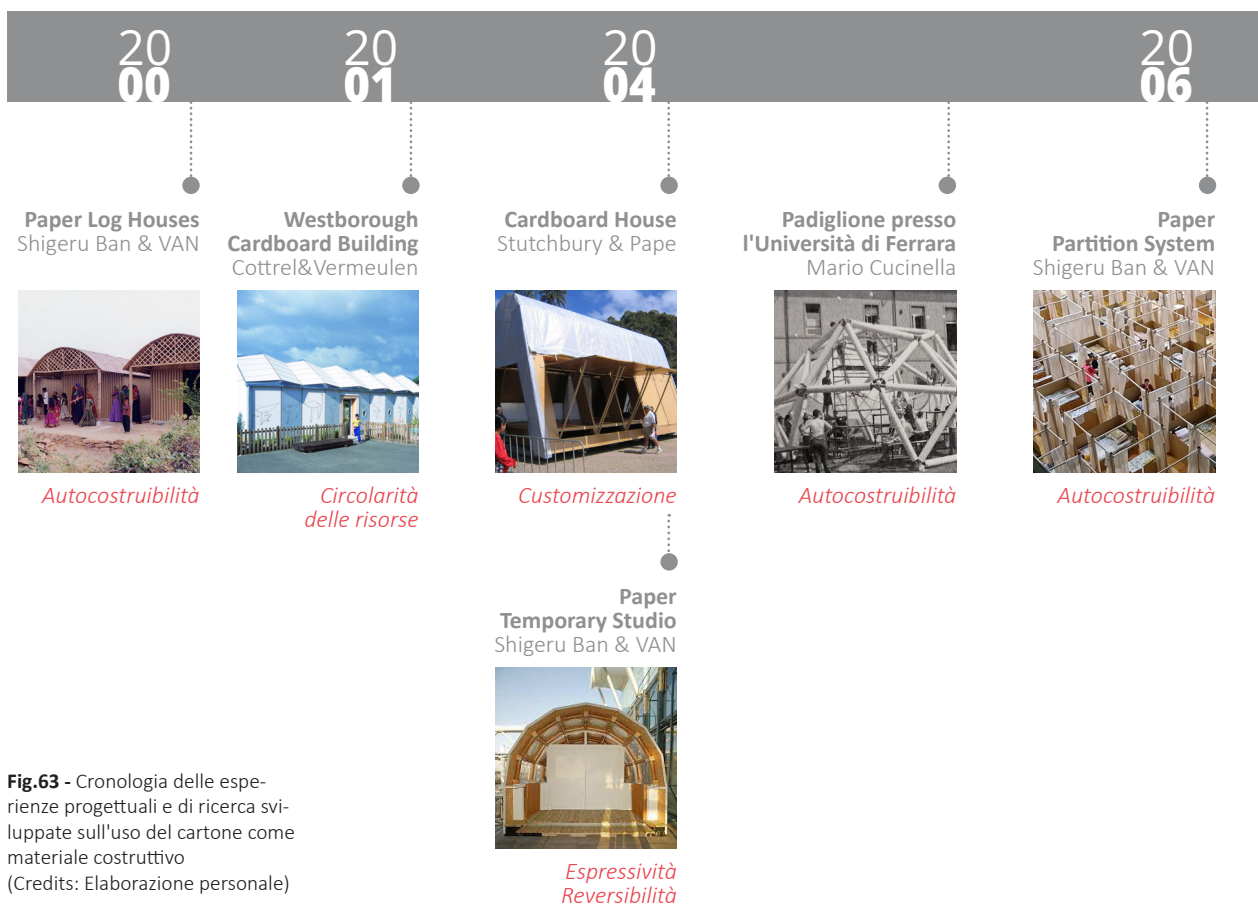
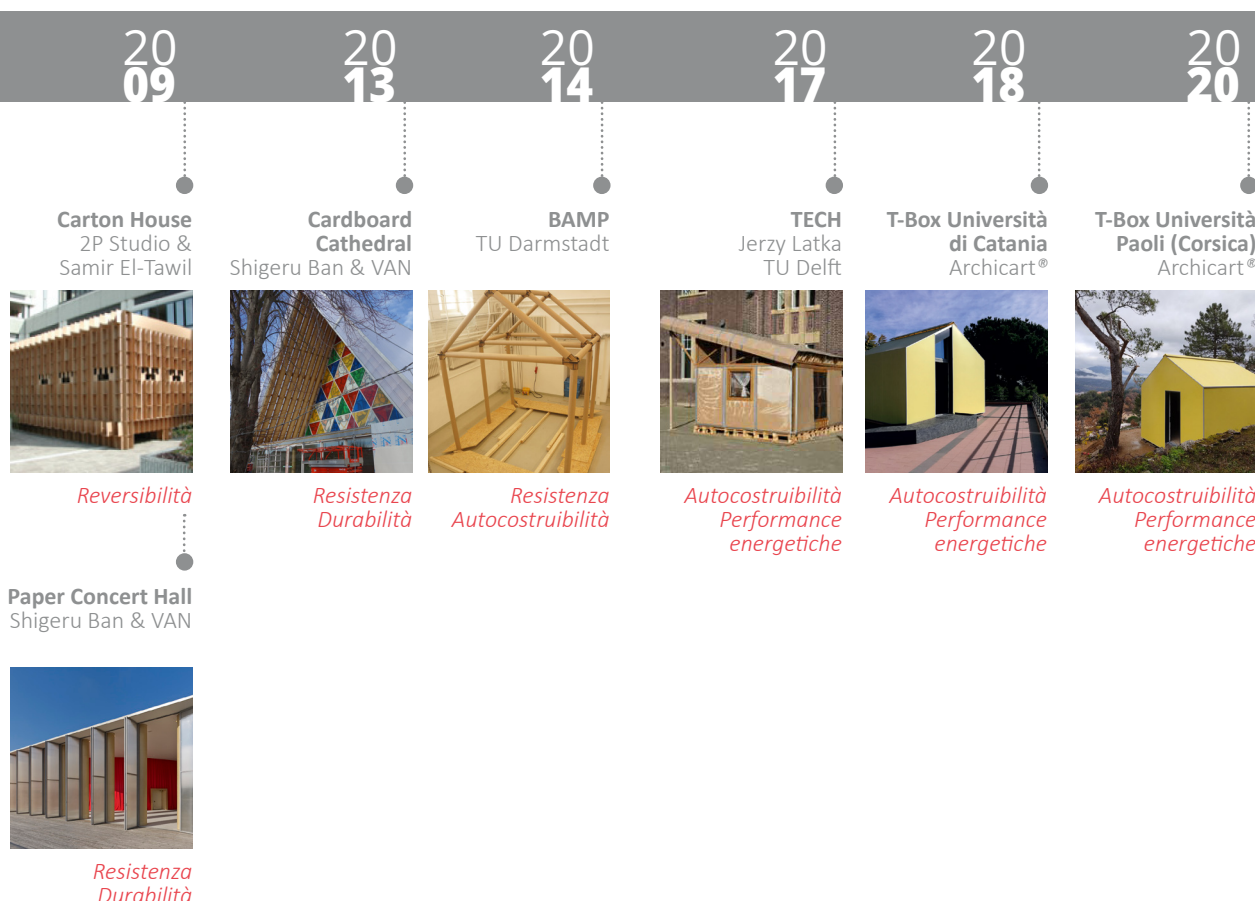


Fig.63 - Cronologia delle esperienze progettuali e di ricerca sviluppate sull'uso del cartone come materiale costruttivo (Credits: Elaborazione personale)

la tecnologia risulti particolarmente rispondente al quadro esigenziale che si è delineato per l'intervento in contesti emergenziali; in un lotto non ancora infrastrutturato, la realizzazione dell'intera unità – dalla predisposizione del sistema di attacco a terra fino al completamento delle finiture e degli impianti – ha infatti richiesto cinque giorni di lavoro con un team di sei operatori impegnati nell'installazione (Distefano *et al.*, 2018; Distefano, 2019).

L'analisi delle esperienze sviluppate in ambito nazionale e internazionale (Fig.63) consente di mettere a fuoco un insieme di corrispondenze e potenzialità nell'utilizzo del cartone come materiale costruttivo, in particolare per i contesti emergenziali ad elevata transitorietà. La leggerezza, la semplicità e la rapidità di assemblaggio degli elementi assicurano una risposta efficiente rispetto all'urgenza di predisposizione dei manufatti; contemporaneamente, la reversibilità delle tecnologie basate sul cartone assecondano le esigenze di flessibilità, adattabilità e ciclicità delle opere. Ciononostante, dalla stessa analisi emerge anche come l'effettivo impiego del cartone per applicazioni costruttive risulti attualmente limitato nella pratica corrente, non esistendo – ad eccezione del caso italiano di Archicart® – un'offerta stabile sul mercato di soluzioni costruttive specificatamente destinate al settore delle costruzioni. In prima istanza, ciò si spiega in considerazione che le aziende della filiera cartaria rivolgono prioritariamente la propria offerta a settori di mercato consolidati come quelli degli imballaggi e l'editoria, che offrono margini di profitto sicuri e sufficienti a sostenere i propri modelli di business. Vi è quindi uno scarso interesse da parte di questi operatori nell'esplorare settori di mercato differenti rispetto a quelli attuali. Tale riflessione trova corrispondenza nel carattere delle esperienze maturate fino ad oggi, che risultano infatti legate a processi sperimentali, privi di una successiva riproposizione nel mercato delle costruzioni. Le realizzazioni analizzate hanno piuttosto attinto a componenti pensati per una generalità di applicazioni, come ad esempio i tubi cavi in cartone, che sono stati appositamente riconvertiti per gli usi costruttivi.



Vi sono poi anche fattori tecnico-prestazionali che, soprattutto in passato, hanno ostacolato il ricorso al cartone come materiale costruttivo. In primis, la vulnerabilità del materiale alle condizioni atmosferiche ha richiesto una lunga sperimentazione – ancora in corso – per verificarne l'utilizzabilità per edifici con cicli di uso di medio-lungo termine. Il tema si lega anche a questioni di natura filologica che sinora hanno limitato il ricorso al cartone come materiale costruttivo. Nell'immaginario collettivo, il cartone viene spesso associato a condizioni di assoluta precarietà dell'abitare, basti pensare alle scatole in cartone utilizzate dai *clochard* per predisporre i propri rifugi di fortuna. Risulta quindi comprensibile un certo scetticismo nell'impiegare lo stesso materiale per fornire soluzioni abitative o, nel caso oggetto di ricerca, manufatti scolastici, che possano rimanere in uso per periodi di tempo prolungati. Tuttavia, i dati e le esperienze sviluppate hanno dimostrato come le tecnologie costruttive basate sul cartone, se opportunamente progettate con accorgimenti tecnico-costruttivi volti a proteggere gli elementi strutturali, siano in grado di assicurare la durabilità dei manufatti anche per usi prolungati (fino a venti anni), ragionevolmente compatibili con le esigenze dell'abitabilità contemporanea. Una sicurezza potenziata anche dai sempre più stringenti sistemi di certificazione richiesti ai prodotti che vengono immessi sul mercato, che forniscono garanzie agli operatori rispetto alle prestazioni in uso dei componenti costruttivi. Occorre inoltre considerare che il ripensamento degli approcci tradizionali in favore di tecniche e materiali costruttivi innovativi sarà, nel prossimo futuro, reso indispensabile in previsione del percorso di transizione ecologica che l'intero settore AEC è chiamato a sviluppare. Le problematiche ambientali e socio-economiche in atto (scarsità di risorse, aumento dei prezzi dei materiali) rendono imperativo lo sforzo di indagare, comprendere e accettare soluzioni inedite per il settore delle costruzioni, favorendone l'aumento della domanda sul mercato per accelerarne la ricerca e sperimentazione.

Infine, una considerazione deve essere fatta anche in merito al ruolo della normativa tecnica di settore. La legislazione che regola l'immissione di nuove tecnologie sul mercato, sommata agli stringenti requisiti ambientali richiesti alle aziende per la partecipazione agli appalti pubblici, richiede una complessità di prove, certificazioni e documentazioni tecniche a garanzia della sicurezza e dell'affidabilità dei sistemi. Tali strumenti, necessari ad evitare il depauperamento delle risorse pubbliche, pongono però gli operatori medio-piccoli della filiera – che costituiscono la maggioranza del tessuto produttivo – nella condizione di non disporre delle risorse necessarie ad affrontare il percorso di certificazione, necessario a immettere nuovi prodotti sul mercato, con una conseguente inibizione delle sperimentazioni nel settore privato e un impoverimento dell'offerta tecnologica.

Nel quadro conoscitivo che si è profilato emerge dunque il contrasto tra una serie di potenzialità delle tecnologie costruttive in cartone – sostenibilità ambientale, circolarità, applicabilità ai contesti emergenziali – e un insieme di limiti tecnici e di approccio che, seppure parzialmente risolti e confutati dalle esperienze analizzate, pongono un freno al consolidamento di un'offerta stabile sul mercato di prodotti in cartone specificatamente destinati alle applicazioni strutturali in edilizia. Nel panorama nazionale, un'eccezione è rappresentata dalla tecnologia di pannelli prefabbricati in cartone **PACOTEC™ Stre-wall**, le cui prestazioni negli ultimi anni sono state oggetto di ricerche in ambito scientifico e industriale per validarne l'utilizzo nella progettazione e realizzazione di manufatti emergenziali. I capitoli successivi analizzano gli esiti di tali studi, approfondendo le caratteristiche prestazionali della tecnologia, con l'obiettivo di verificarne l'utilizzabilità anche al campo di indagine dell'infrastrutturazione scolastica di emergenza.

4.5. La tecnologia di pannelli prefabbricati PACOTEC™ Stre-wall

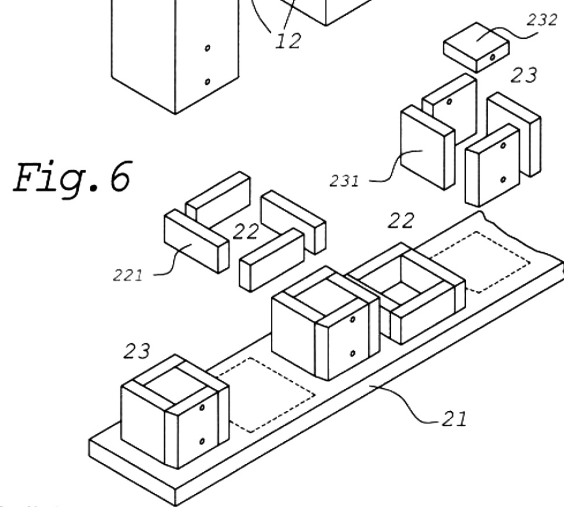
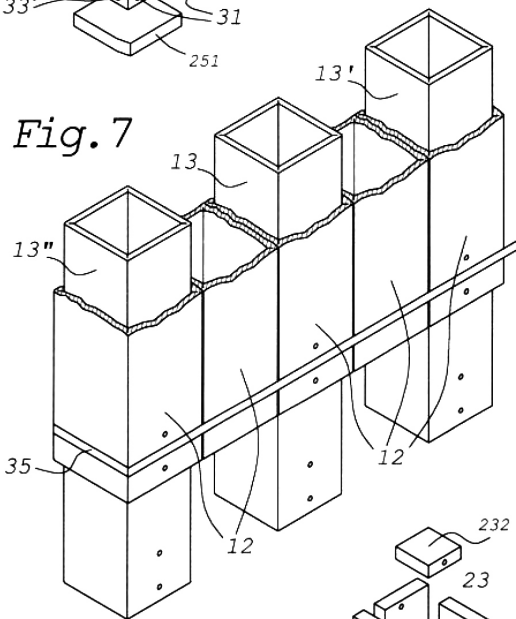
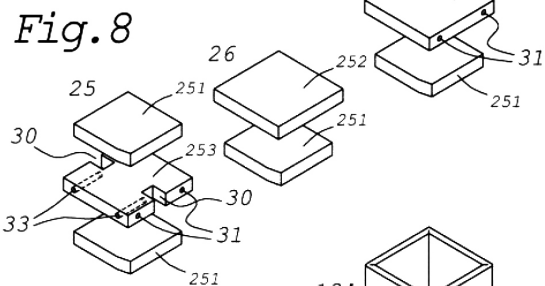
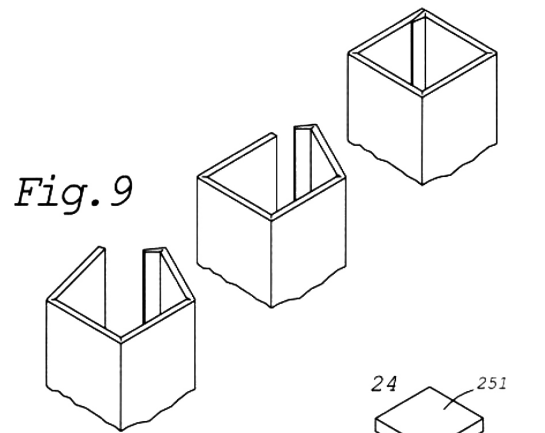
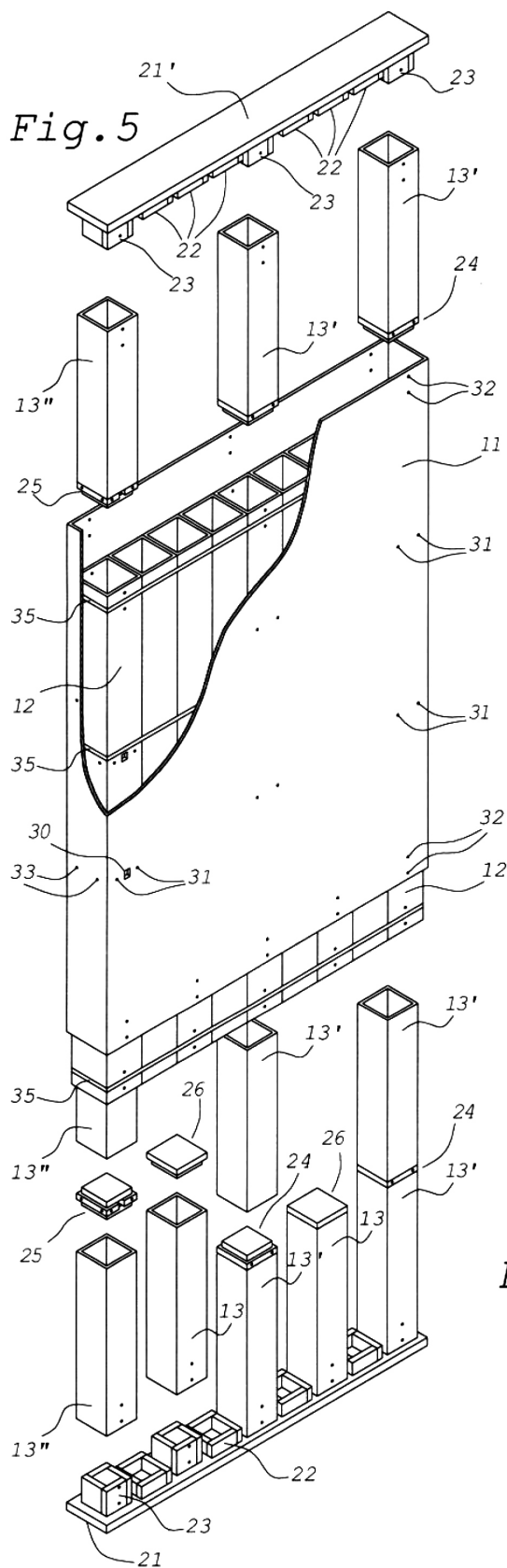
La ricognizione delle esperienze progettuali e delle tecnologie costruttive ha messo in evidenza come attualmente vi sia una limitata disponibilità di sistemi tecnologici basati sul cartone e specificatamente destinati al settore edile. Nel panorama italiano, le indagini condotte hanno permesso di rintracciare la tecnologia di pannelli prefabbricati in cartone **PACOTEC™ Stre-wall**, prodotta dal marchio siciliano Archicart® dell'azienda AREA S.r.l. (Catania). La tecnologia è stata messa a punto nel 2015 dal lavoro dell'Ing. Dario Luigi Distefano, fondatore di Archicart®, le cui ricerche, svolte inizialmente presso l'Università di Catania e poi all'interno dell'azienda da lui fondata, sono state indirizzate a studiare un sistema di piegatura dei fogli piani in cartone che potesse conferire al materiale una resistenza meccanica adeguata a realizzare elementi costruttivi con funzione strutturale.

La tecnologia brevettata si basa sull'utilizzo di pannelli prefabbricati, utilizzabili con funzione strutturale per la creazione di pareti portanti continue verticali, solai orizzontali ed elementi di partizione interna (Fig.64). Il concept del componente base è stato sviluppato a partire da un modulo standard di dimensione variabile (fino a 180 cm di sviluppo in larghezza), aggregabile liberamente a seconda delle necessità progettuali. La struttura del pannello è di tipo alveolare, ed è costituita da una serie di elementi tubolari interni a sezione cava rettangolare, che vengono giustapposti e resi solidali attraverso incollaggio, e assorbono i carichi di compressione verticali. La serie di tubolari è confinata da due elementi esterni in cartone, detti appunto "fogli esterni", che hanno la funzione di uniformare l'aspetto del pannello, nascondendo la fuga tra i tubolari, e di dare maggiore coesione alla struttura di tubolari interni. Inoltre, ai fogli esterni è affidato il compito di protezione dei tubolari da eventuali agenti esterni, attraverso un trattamento idrofugo della copertina che ne assicura la resistenza all'acqua o ad altre sostanze che possono attaccare il pannello.

Seppure il componente base del sistema, ovvero il pannello prefabbricato, sia verificato per l'uso come elemento strutturale, attualmente la soluzione adottata per verificare la conformità normativa degli edifici prevede di demandare la funzione strutturale ad un sistema a telaio leggero in legno (montanti e traversi) che viene integrato all'interno dei tubolari. Tale soluzione si rende necessaria dal momento che i contenuti delle NTC 2008 non normano gli aspetti di calcolo e verifica strutturale per questa particolare tecnologia costruttiva e al momento sono in corso le prove sperimentali per l'ottenimento delle necessarie certificazioni del sistema.

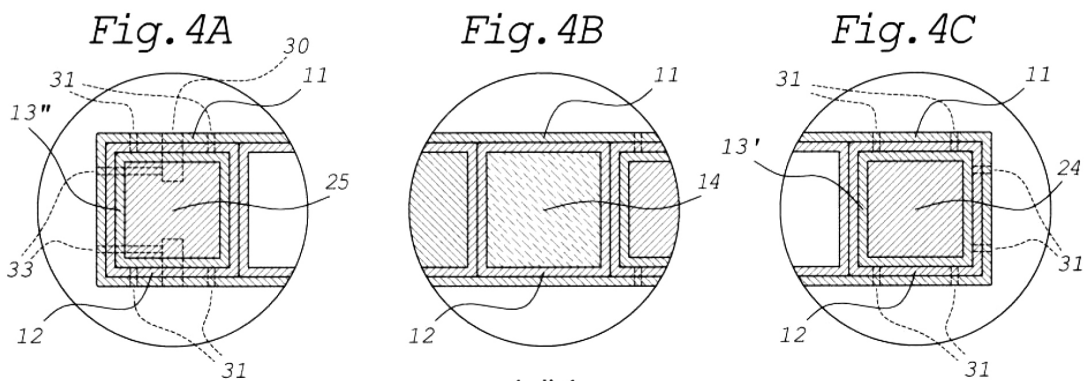
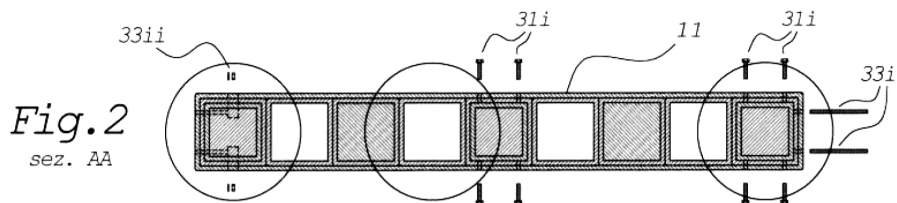
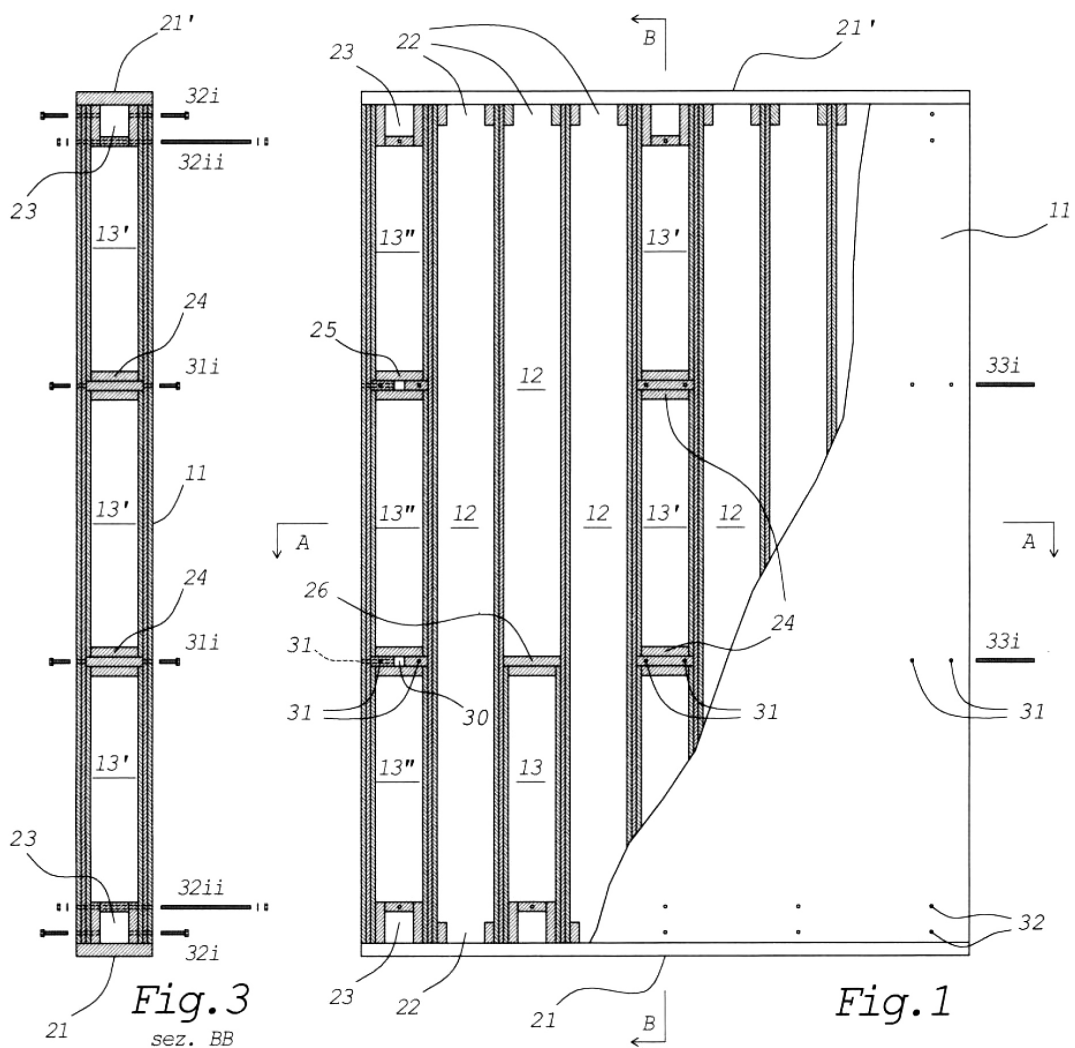
La produzione dei pannelli avviene a partire da fogli stesi di cartone ondulato a tripla onda (struttura composta da quattro fogli tesi e tre ondulazioni). I fogli vengono prima rifilati per eliminare eventuali difetti dei bordi dovuti al trasporto o allo stoccaggio, quindi vengono tagliati secondo le dimensioni dell'elemento da realizzare, ovvero secondo lo sviluppo dei tubolari o fogli esterni stesi. La piegatura viene conferita attraverso un'operazione chiamata "cordatura", una tecnica usata dall'industria cartotecnica che consiste nell'imprimere una forza continua lungo una linea del foglio per facilitarne la successiva snervatura e piegatura. I tubolari vengono perciò assemblati piegando e incollando consecutivamente le cinque facce ottenute dal foglio di cartone, che vengono mantenute in forma per il tempo necessario all'asciugatura attraverso pesi e morsetti e successivamente fissati con graffe metalliche. Con una successiva operazione di incollaggio si provvede a unire il numero di tubolari richiesto per ciascun pannello, confinandoli successivamente con i due fogli esterni (Figg.65,66).

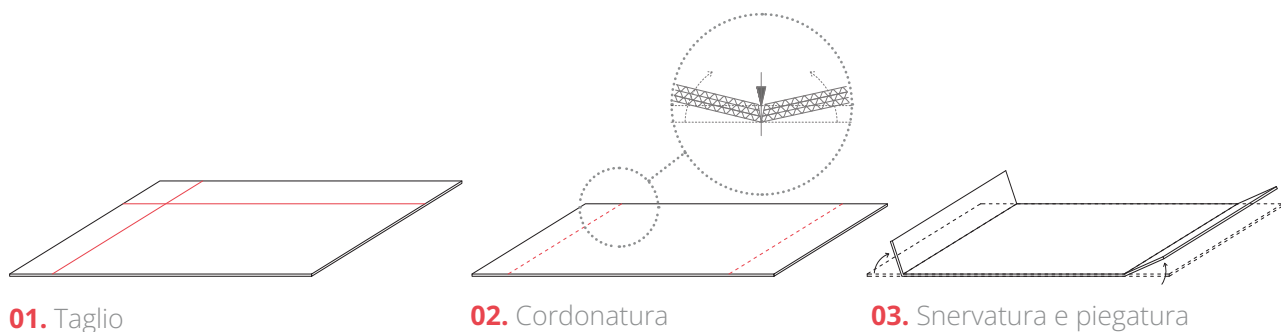
Una volta completata la struttura in cartone, il volume cavo dei tubolari è riempito tramite insufflaggio di materiale isolante sfuso, scelto tra una serie di opzioni a catalogo tra cui fibra di cellulosa, argilla espansa o altri materiali naturali. Il pannello così composto è chiuso, alla base, in sommità, e in corrispondenza dei fori per gli infissi, dall'inserimento di tavole in legno, che assolvono alla funzione di chiusura del pannello, di supporto per l'integrazione delle



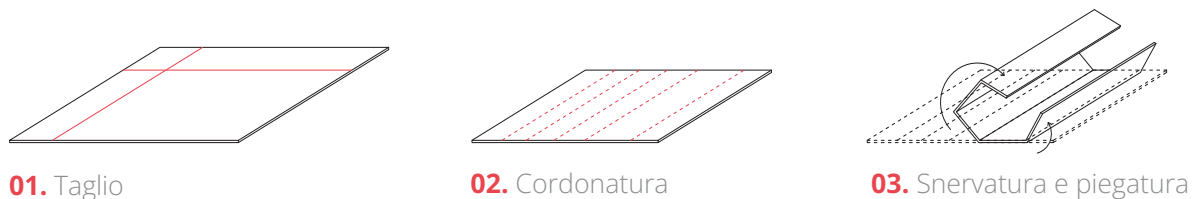
- 2 di 4 -

Fig.64 - Brevetto sistema PACOTEC™ Pannello costruttivo in cartone ondulato, assemblaggio e metodo (Brevetto WIPO: 10CT2014A000006, Inventori: D.L.Distefano, V.Sapienza, 2016)

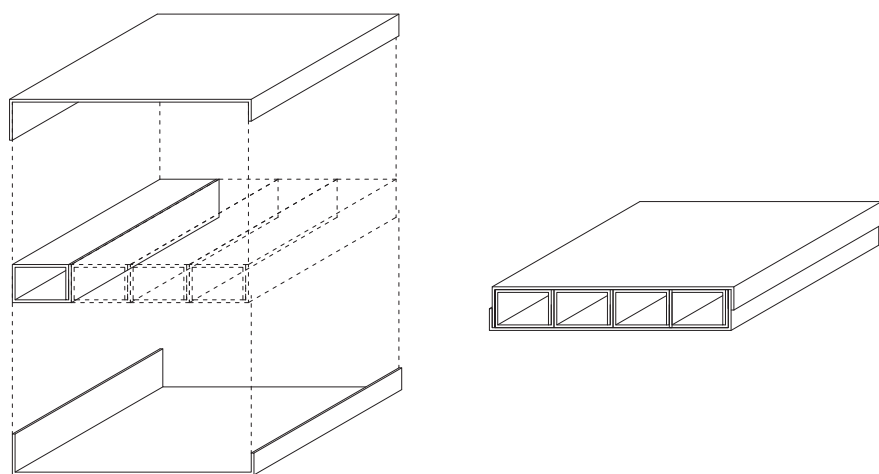




Fogli esterni



Tubolari interni



04. Assemblaggio

Pannello PACOTECH™ Stre-wall

Fig.65 - Fasi di lavorazione e assemblaggio dei fogli di cartone per la realizzazione di un pannello prefabbricato (Credits: Elaborazione personale)



Fig.66 - Fasi di lavorazione dei fogli di cartone (Credits: Foto personale, 2020)

piastre in acciaio di connessione e di assorbimento dei carichi strutturali.

L'attacco a terra può essere realizzato, su siti già parzialmente infrastrutturati o su terreni compatti, predisponendo una serie di appoggi puntuali regolabili in materiale plastico, a loro volta ancorati a basi in calcestruzzo prefabbricate (Fig.67). Su tale sistema si installa un impalcato di travi in legno che funziona da appoggio per i pannelli orizzontali di calpestio, che vengono opportunamente protetti dall'umidità attraverso l'inserimento (dall'esterno verso l'interno) di teli barriera e freno al vapore.

La connessione orizzontale tra i pannelli avviene attraverso una serie di barre filettate inserite nei tubolari alle estremità, in modo da garantire la coesione della struttura e la trasmissione delle azioni orizzontali tra i pannelli. L'inserimento di guarnizioni tra i pannelli accostati, ovvero di nastri in materiale plastico auto-espandente, assicura la tenuta all'aria e all'acqua (Fig.68). L'impermeabilizzazione sul lato esterno è ulteriormente garantita da un sistema di rivestimento a doppia pelle, che viene installato in opera. Il tipo di rivestimento utilizzato nei prototipi finora installati ha previsto un telo plastico in PVC, tensionato su tutte le facce della struttura attraverso guide in alluminio. Ciononostante, la modularità della struttura consente di integrare diverse soluzioni di rivestimento esterno di tipo leggero, come doghe in alluminio, lamiere, pannelli in materiale composito come HPL, ecc. Sul lato interno, i pannelli possono essere invece completati prevedendo una serie di trattamenti e finiture a scelta (opzionali rispetto a quello idrofugo standard), da applicare sulla copertina dei fogli esterni: trattamento ignifugo, a stampa diretta o UV, carta da parati, verniciatura.

Dal punto di vista della durabilità, il mantenimento delle prestazioni è attualmente garantito per un tempo di vita utile dei pannelli di cinque anni, a fronte di una corretta progettazione tecnica dei giunti ed un corretto stato manutentivo in fase di uso. Tale orizzonte temporale risulta coerente e compatibile con le esigenze per le quali si è inteso sfruttare la tecnologia, ovvero per la realizzazione di interventi contingenziali di edilizia scolastica con cicli di uso di breve-medio termine.



Fig.67 - Esempio di sistema di attacco a terra reversibile, realizzato attraverso appoggi puntuali prefabbricati e regolabili (Credits: Foto personale, 2020)



Fig.68 - Completamento del sistema tecnologico: sigillatura dei giunti e integrazione della sotto-struttura per il tensionamento del telo plastico di rivestimento esterno (Credits: © Archicart®)

Le principali caratteristiche dimensionali e tecnico-prestazionali dei pannelli prefabbricati in cartone sono riportati di seguito nella Tabella 01 (Distefano, 2019; Archicart®, 2021):

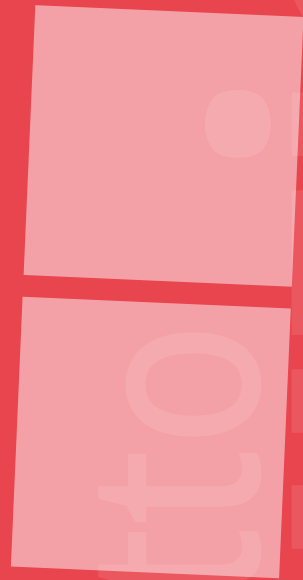
Tab.01 - Caratteristiche dimensionali e prestazionali dei pannelli prefabbricati in cartone PACOTEC™ Stre-wall

Caratteristiche dimensionali	
Larghezza pannello	Su misura (min. 60 cm, max. 180cm)
Altezza pannello	Su misura (max. 480 cm) <i>Se l'altezza del pannello supera 308 cm, è necessario inserire un giunto orizzontale di 1 cm (in cartone o alluminio) in considerazione delle dimensioni massime del foglio di cartone utilizzabile all'esterno</i>
Spessore pannello	Su misura
Caratteristiche tecniche	
Tolleranza dimensionale	± 3 mm
Peso	30 kg/m ²
Reazione al fuoco	<i>In fase di omologazione</i>
Isolamento acustico di facciata D2m,n,Tw	31 dB
Trasmittanza termica U	0.22 W/m ² K (fibra di cellulosa)
Resistenza meccanica sul piano	5000 kPa
Resistenza meccanica a compressione verticale	70.6 kN (verifica su pannello di dimensioni 121x240x22 cm)
Emissione di sostanze tossiche	Assente

L'analisi delle prestazioni tecniche e ambientali dei pannelli prefabbricati in cartone, analizzate tramite fonti indirette e osservate sul campo, hanno permesso di formulare una prima ipotesi sulla possibilità di sfruttare tale tecnologia nella formulazione di una proposta progettuale per un modello di unità scolastica emergenziale. Un campo di intervento che, come si è visto, richiama la verifica di un quadro esigenziale eterogeneo, in cui si confrontano requisiti di carattere spaziale, ambientale – peculiari della funzione educativa – e di efficienza del prodotto e processo edilizio, sostenibilità ambientale e circolarità delle risorse, richiamati più propriamente dalla normativa per l'edilizia pubblica. Al fine quindi di verificare l'effettiva rispondenza della tecnologia **PACOTEC™ Stre-wall** rispetto a questo complesso insieme di esigenze, è stata prevista un'analisi delle sue prestazioni rispetto alle tecnologie di prefabbricazione (MMC) attualmente disponibili nel mercato europeo.

MMC

PACOTEC



Adattabilità

Flessibilità

II.5 Analisi comparata delle performance della tecnologia rispetto ai MMC

5.1. Obiettivi dell'analisi

Le attività di analisi istruttoria prefigurano dei margini di rispondenza delle tecnologie costruttive basate sull'uso del cartone rispetto al quadro esigenziale richiesto per gli interventi di edilizia scolastica emergenziale, in particolare rispetto agli obiettivi di sostenibilità ambientale e circolarità del ciclo di vita delle opere. Nel panorama italiano, l'indagine conoscitiva ha portato in evidenza la tecnologia di pannelli prefabbricati in cartone **PACOTEC™ Stre-wall**, per la quale sono state sviluppate ricerche che hanno verificato le qualità prestazionali dei componenti costruttivi per gli usi in edilizia. Ciononostante, le esperienze progettuali finora sviluppate con la tecnologia risultano legate a processi di natura sperimentale, e non specificatamente destinati all'edilizia scolastica; rimangono dunque aperte una serie di domande legate all'applicabilità del sistema tecnologico al campo di indagine dell'edilizia scolastica di emergenza. Il quadro di esigenze a cui rispondere mette infatti a sistema un insieme complesso di istanze, che riguardano la rapidità ed economicità di intervento, la qualità costruttiva e ambientale dei manufatti, la sostenibilità e la razionalizzazione delle risorse per la riduzione dell'impatto ambientale del prodotto-processo edilizio. Rispetto a questo quadro, i dati e le conoscenze reperite dalla letteratura non sono risultati sufficienti a prefigurare l'effettiva utilizzabilità della tecnologia nel campo dell'edilizia scolastica, ed è perciò emersa la necessità di approfondire e valutare le prestazioni globali della tecnologia rispetto alle richieste del programma edilizio.

Le fasi successive della ricerca sono state quindi tese ad a verificare l'applicabilità della tecnologia nella formulazione di una proposta progettuale per un modello di unità scolastica. Al fine di operare una valutazione oggettiva e coerente rispetto agli obiettivi dell'analisi, lo studio è stato condotto comparando le performance della tecnologia in cartone con quelle di altre tecnologie di prefabbricazione (MMC), maggiormente consolidate nella pratica operativa, che sono state utilizzate come riferimento rispetto al quale valutare gli elementi di vantaggio o criticità associati all'uso del sistema. In positivo, l'analisi ha avuto come obiettivo anche quello di individuare l'insieme di strategie che i *decision makers* possono implementare per incrementare l'efficienza e la sostenibilità del processo edilizio della tecnologia di pannelli in cartone, ed in particolare nelle fasi di progettazione e produzione dei componenti prefabbricati. Nello specifico, le domande a cui si è inteso rispondere sono:

- **D.01:** Quali sono gli elementi di efficienza e di debolezza, anche rispetto agli altri MMC, connessi all'utilizzo della tecnologia di pannelli prefabbricati in cartone per la realizzazione di edifici scolastici di emergenza?
- **D.02:** Quali strategie e approcci di innovazione possono essere implementati nelle fasi di progetto e produzione dei componenti per promuoverne una maggiore efficienza, qualità e sostenibilità del ciclo di vita del prodotto-processo edilizio?

Per rispondere tali domande, è stato promosso un lavoro di indagine suddiviso in tre fasi, ovvero: (1) analisi qualitativa di 13 processi di progettazione e produzione di MMC sviluppati in Europa; (2) valutazione e comparazione delle performance della tecnologia **PACOTEC™ Stre-wall**, rispetto agli altri MMC, secondo criteri qualitativi orientati alla sostenibilità del processo edilizio; (3) estrapolazione di una serie di linee guida, che sintetizzano le strategie ed approcci da implementare nel processo, in particolare nelle fasi di progettazione e produzione dei pannelli prefabbricati in cartone, per incrementarne la qualità e la sostenibilità ambientale, economica e sociale delle opere.

5.2. Metodologia e strumenti di indagine

La metodologia adottata per rispondere alle domande di ricerca è strutturata in due principali macro-fasi (Fig.69) di progressivo approfondimento:

→ Fase 01 Analisi di 13 processi di prefabbricazione

La prima fase ha previsto lo studio dei processi di progettazione e produzione di 13 tecnologie costruttive basate sulla prefabbricazione (MMC), selezionate tra quelle disponibili in Europa e impiegate per la realizzazione di interventi di edilizia scolastica emergenziale. L'analisi dei processi è stata portata avanti attraverso una serie di passaggi e step intermedi di lavoro, e nello specifico:

- a. **Definizione del campione di indagine:** i processi analizzati riguardano 13 tecnologie di prefabbricazione, selezionate tra quelle più recenti sviluppate nel mercato europeo, con particolare riferimento a quelle afferenti ai MMC. Tra questi, l'analisi si è concentrata su tre specifiche macro-categorie, classificate in accordo allo schema proposto dal *MMC Definition Framework* del MHCLG Joint Industry Working Group (UK) (AA.VV., 2019), ovvero: (1) sistemi a unità modulari tridimensionali; (2) sistemi a pannelli bidimensionali e (3) manifattura additiva. I MMC sono stati scelti anche con riferimento alle tecnologie utilizzate, nella pratica corrente, per lo specifico campo di intervento individuato dalla ricerca, ovvero l'infrastrutturazione scolastica di emergenza. I processi di prefabbricazione analizzati sono elencati nella Tabella X.
- b. **Individuazione dei criteri di analisi e preparazione di una scheda per la raccolta dati.** Al fine di analizzare e successivamente operare un confronto tra la tecnologia di pannelli prefabbricati in cartone rispetto agli altri MMC, sono stati individuati 11 criteri omogenei rispetto ai quali acquisire i dati relativi agli aspetti prestazionali del processo edilizio. Nello specifico, sono stati individuati tre macro-ambiti di approfondimento dei MMC, ovvero:
 - Caratteristiche tecnologiche, finalizzate ad indagare le prestazioni dei sistemi rispetto alla loro messa in opera, flessibilità e configurabilità spaziale;
 - Caratteristiche dei materiali, in cui si analizza la tipologia di risorse utilizzate, con particolare attenzione all'impatto ambientale del ciclo di vita dei materiali;
 - Caratteristiche di produzione, in cui si approfondiscono gli aspetti relativi alle tecniche e metodi di fabbricazione industrializzata, focalizzandosi su quelli che permettono un maggior controllo qualitativo e l'attivazione di logiche di produzione *lean*.

L'elenco di criteri selezionati per l'analisi è descritto alla Tabella 03, che riporta puntualmente la descrizione

1. La Categoria 4) Manifattura additiva, pur non essendo direttamente associabile al concetto di prefabbricazione intesa come produzione fuori opera di componenti e/o parti dell'edificio, è stata inclusa nell'analisi in quanto nella letteratura scientifica rientra nell'insieme dei MMC e delle tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0. (Cfr. Pt. I, Cap. 2.2.).



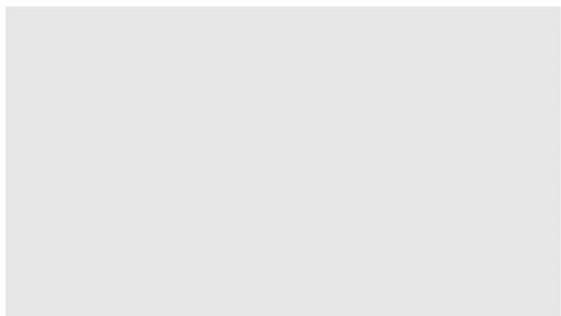
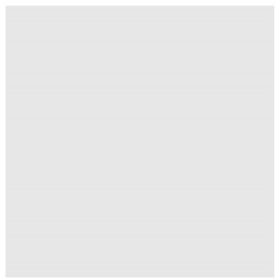
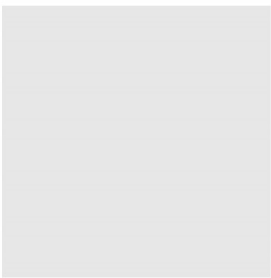
Fig.69 - Metodologia utilizzata per l'analisi comparata della tecnologia PACOTEC™ Stre-wall rispetto ai MMC (Credits: Elaborazione personale)

Tab.02 - Campione di MMC analizzato (a, b) e bibliografia di riferimento utilizzata per la raccolta dati (c)

Categoria secondo il MMC Definition Framework (a)	Tecnologie di prefabbricazione (b)	Bibliografia di riferimento (c)
Categoria 1) Sistemi strutturali tridimensionali prefabbricati	T.01 Unità modulari pre-assemblate	(Mapston & Westbrook, 2010; Knaack <i>et al.</i> , 2012)
	T.02 Container ISO	(Dara <i>et al.</i> , 2019; Shen <i>et al.</i> , 2020)
	T.03 Unità modulari con struttura in <i>Light Steel Frame</i> (LSF)	(Staib <i>et al.</i> , 2007; Smith, 2010; Ermolli & Galluccio, 2019; Tavares <i>et al.</i> , 2019)
	T.04 Unità modulari con struttura a telaio <i>platform-frame</i>	(Staib <i>et al.</i> , 2007; Smith, 2010; Tavares <i>et al.</i> , 2019; Orłowski, 2020)
	T.05 Unità modulari con struttura in <i>Cross Laminated Timber</i> (CLT)	(Staib <i>et al.</i> , 2007; Smith, 2010; Tavares <i>et al.</i> , 2019)
	T.06 Unità modulari in calcestruzzo	(Smith, 2010; Lawson <i>et al.</i> , 2014; Tavares <i>et al.</i> , 2019)
Categoria 2) Sistemi strutturali bidimensionali prefabbricati	T.07 Pannelli SIP (Structural Insulated Panels)	(Smith, 2010; Structural Insulated Panels Association, n.d.)
	T.08 Sistemi a pannelli <i>Light Steel Frame</i> (LSF)	(Smith, 2010; Knaack <i>et al.</i> , 2012; Ermolli & Galluccio, 2019)
	T.09 Sistemi a pannelli <i>platform-frame</i>	(Arieff & Burkhart, 2002; Staib <i>et al.</i> , 2007; Knaack <i>et al.</i> , 2012; Orłowski, 2020)
	T.10 Sistemi a pannelli <i>Cross Laminated Timber</i> (CLT)	(Staib <i>et al.</i> , 2007; Smith, 2010; Knaack <i>et al.</i> , 2012; Lehmann, 2013)
	T.11 Sistemi a pannelli in calcestruzzo	(Smith, 2010; Knaack <i>et al.</i> , 2012)
	T.12 —Sistema a pannelli prefabbricati in cartone	(Rogora, 2006; Latka, 2017; Distefano <i>et al.</i> , 2018; Distefano, 2019)
Categoria 4) Manifattura additiva ¹	T.13 —Stampa 3D	(Hager <i>et al.</i> , 2016; Perrot <i>et al.</i> , 2018)

della tipologia di informazioni acquisite per l'indagine. Rispetto agli indicatori utilizzati, è opportuno considerare che alcune informazioni come costi, tempi di produzione o disponibilità dei materiali sono strettamente dipendenti dalle caratteristiche delle aziende, come la loro dimensione, capillarità sul territorio, capacità produttiva, ecc. Per questo motivo, i criteri adottati per l'analisi sono stati circoscritti a quelli comuni a tutte le tecnologie prefabbricate, ovvero a quelli che non dipendono dall'organizzazione e/o dalla strategia di business adottata da specifici produttori. Per facilitare la sistematizzazione e la comparazione dei dati, è stata predisposta una scheda sintetica per la raccolta delle informazioni (Fig.70). La scheda si compone di quattro sezioni, che ricalcano la struttura delle categorie di approfondimento, ovvero: (1) Descrizione generale, (2) Caratteristiche tecnologiche, (3) Caratteristiche dei materiali e (4) Caratteristiche di produzione.

- c. Raccolta e schedatura dei dati:** le informazioni qualitative e quantitative relative a ciascun processo sono state raccolte e sintetizzate nelle schede precedentemente predisposte. I dati sono stati reperiti attraverso indagine bibliografica, nello specifico consultando articoli in riviste scientifiche, manuali e pubblicazioni accessibili da repository online. I riferimenti bibliografici utilizzati per la raccolta dei dati sono riportati in corrispondenza di ciascuna tecnologia nella Tabella 03, colonna (c). Le informazioni così raccolte sono state contemporaneamente integrate dall'esperienza diretta sul campo, ovvero attraverso una serie di interviste con esperti del settore, visite in stabilimenti produttivi e/o in cantieri, con cui è stato possibile reperire le informazioni necessarie a completare l'indagine.

T.XX Tecnologia	
Categoria MMC	Categoria 1) Sistemi strutturali tridimensionali prefabbricati
	
<p>Descrizione</p> <p>Le unità modulari in acciaio sono realizzate attraverso pannelli continui a telaio leggero in acciaio (<i>Light Steel Frame, LSF</i>), ovvero formati da profili presso-piegati uniti tramite connessioni a secco. Tale soluzione permette un elevato grado di integrabilità delle componenti di impianto, permettendo di ottimizzare lo spazio a disposizione. Le unità modulari sono assemblate <i>off-site</i> secondo una linea di produzione continua, e possono essere trasportate in sito con gradi progressivi di completamento (dalla sola struttura fino all'integrazione di sistemi di chiusura e infissi).</p>	
 	

Caratteristiche tecnologiche	
Livello di prefabbricazione	Fino al 95%
Flessibilità e integrabilità del sistema	Il sistema garantisce flessibilità progettuale attraverso la possibilità di aggregare e combinare i moduli anche su più piani. Tuttavia, le configurazioni spaziali risultano limitate a causa dei vincoli morfologici e dimensionali dei moduli. Dal punto di vista della modificabilità nel tempo, le unità possono essere disinstallate e/o aggiunte per assecondare la variabilità del programma spaziale.
Trasporto e installazione	Il dimensionamento delle unità modulari deve essere valutato in accordo alla normativa per il trasporto, in modo da limitare il ricorso a trasporti di tipo eccezionale. Ai fini della trasportabilità, le unità modulari devono essere frequentemente sovra-dimensionate per supportare i carichi dinamici, con conseguente aumento di materiale, costi e peso.
Riduzione dei tempi di messa in opera	50-70%
Caratteristiche dei materiali	
Materiale strutturale	Acciaio
Fonti di approvvigionamento	L'acciaio utilizzato nella produzione delle unità impiega materie prime provenienti da fonti di riciclo, diminuendo la necessità di estrazione e lavorazione di materia vergine
Opzioni di gestione a fine vita	Le unità modulari possono essere dismesse e ricollocate al termine dell'uso grazie all'uso di sistemi di connessione reversibili. In seguito alla dismissione, l'acciaio può essere riciclato senza perdere le sue prestazioni.
Caratteristiche di produzione	
Approccio alla progettazione	La progettazione esecutiva dei moduli e la produzione sono sviluppate secondo un approccio <i>file-to-factory</i> , ovvero a partire dalla modellazione digitalizzata dei componenti (profili, pannelli) è possibile trasferire direttamente le specifiche di fabbricazione ai macchinari a controllo numerico
Sequenze e tecniche di lavorazione	I profili in acciaio sono presso-piegati attraverso macchinari ad elevata precisione e controllo numerico. La fabbricazione avviene a partire da <i>coil</i> (stringhe a basso spessore) di materiale continuo, che permette di ridurre al minimo gli scarti di materiale. L'assemblaggio viene sviluppato secondo una catena produttiva continua, in cui ad ogni cella corrisponde una specifica operazione.
Impatto ambientale della produzione	La produzione dell'acciaio risulta un processo ad alta intensità energetica e con elevata produzione di CO2.
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	Le unità modulari vengono prodotte secondo un approccio di customizzazione di massa, ovvero a partire da elementi costruttivi standardizzati (sezioni dei profili) è possibile aggregare configurazioni personalizzate a fronte di una minima riprogrammazione della catena di montaggio. Al fine di garantire tale possibilità, le strategie commerciali maggiormente utilizzate sono quelle <i>Assembled-to-Stock (ATS)</i> and <i>Made-to-Order (MTO)</i> .
 	

Fig.70 - Esempio di schede utilizzate per la raccolta dei dati nella fase di analisi dei MMC (Credits: Elaborazione personale)

Tab.03 - Criteri utilizzati per l'analisi dei MMC

Criteri di analisi (a)		Descrizione dei criteri (b)
Caratteristiche tecnologiche	Livello di prefabbricazione	Descrive il massimo grado di prefabbricazione dei componenti del sistema costruttivo, ovvero la percentuale di completamento con cui gli elementi vengono prodotti <i>off-site</i> e trasportati in cantiere per l'installazione.
	Flessibilità e integrabilità del sistema	Analizza le caratteristiche di flessibilità del sistema tecnologico, ovvero la capacità di integrazione con le componenti di impianto, con altre tecnologie e sistemi costruttivi. Vengono inoltre approfonditi gli aspetti relativi alla modificabilità nel tempo dell'edificio, ovvero la capacità di dismettere selettivamente componenti e/o parti del sistema, di sostituire gli elementi per la manutenzione e di modificare gli spazi per assecondare i cambiamenti nelle esigenze di uso.
	Trasporto e installazione	Indaga le modalità di trasporto e installazione dei componenti prefabbricati in cantiere, con particolare riferimento a potenziali aspetti critici connessi con la movimentazione dei componenti e/o specifiche strategie impiegate per l'ottimizzazione delle fasi di trasporto e messa in opera.
	Riduzione dei tempi di messa in opera	Riporta sinteticamente la percentuale di riduzione dei tempi di intervento rispetto a tecniche di costruzione tradizionali.
Caratteristiche dei materiali	Materiale strutturale	Identifica la tipologia di materiale strutturale adottato.
	Fonti di approvvigionamento	Analizza le caratteristiche relative alle fonti di provenienza del materiale, evidenziando in modo particolare l'utilizzo di materiali provenienti da fonti di riciclo, l'impiego di elementi riutilizzati e/o l'adozione di pratiche improntate ad una gestione sostenibile delle fonti di approvvigionamento delle materie prime.
	Opzioni di gestione a fine vita	Esamina le modalità di reimmissione delle risorse nel flusso di materiali al termine del ciclo di vita utile dell'edificio, evidenziando in modo particolare le strategie volte alla valorizzazione delle risorse attraverso pratiche circolari di riuso, riciclo, rimanifattura, ecc.
Caratteristiche di produzione	Approccio alla progettazione	Descrive l'approccio metodologico utilizzato nelle fasi di progettazione degli elementi del sistema costruttivo, individuando le strategie operative adottate per la gestione coordinata tra le fasi di progetto e quelle di successiva produzione dei componenti prefabbricati.
	Sequenze e tecniche di lavorazione	Analizza le tecniche e strumenti per la fabbricazione industrializzata degli elementi e componenti costruttivi, con particolare attenzione a quelli automatizzati, ad elevata precisione e controllo sulla qualità del prodotto finale, oltre che le modalità di organizzazione della catena di produzione e assemblaggio.
	Impatto ambientale della produzione	Indaga le ricadute ambientali associate alla lavorazione del materiale, nello specifico analizzando il fabbisogno energetico richiesto dalla produzione e i potenziali di emissione di sostanze inquinanti in atmosfera.
	Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	Descrive l'approccio sotteso al prodotto-processo di prefabbricazione nell'ottica di personalizzazione delle caratteristiche finali dei componenti/sistemi costruttivi, ovvero il grado di flessibilità offerto dalla produzione e la strategia commerciale con cui il prodotto viene immesso sul mercato (livello di standardizzazione).

→ Fase 02 Valutazione comparata delle prestazioni delle 13 tecnologie prefabbricate (MMC)

La valutazione dei MMC è stata sviluppata attraverso 21 parametri qualitativi, individuati come aspetti rappresentativi della sostenibilità ambientale, economica e sociale dei processi edilizi (Tabella 04, colonna (b)). I parametri descrivono infatti le prestazioni richieste per indirizzare una serie di obiettivi di sostenibilità e qualità del prodotto-processo edilizio, secondo le corrispondenze descritte nella Tabella 04, colonna (a). I parametri sono stati individuati a partire dai risultati di ricerche e sperimentazioni precedenti, che mettono in relazione determinate caratteristiche e/o particolari impostazioni del processo edilizio con l'efficientamento, in ottica di sostenibilità, del ciclo di vita delle tecnologie costruttive (Piroozfar et al., 2012; Krug e Miles, 2013; Musa et al., 2014; Serra Soriano et al., 2014; Generalova et al., 2016; Jensen et al., 2016; Oesterreich e Teuteberg, 2016; Minunno et al., 2018; Jiang et al., 2019; Ejsmont e Gladysz, 2020; Jansen van Vuuren e Middleton, 2020). Per ciascuna tecnologia, il raggiungimento/soddisfacimento dei parametri individuati è stato verificato attraverso una comparazione analitica con i dati raccolti nella Fase 1; i risultati sono stati successivamente riportati in maniera sintetica in una matrice di confronto (Tab.05).

I risultati dell'analisi comparata hanno infine permesso di individuare una serie di linee guida e strategie (Cfr. **Pt. II, Cap. 5.5**) che possono essere implementate nella progettazione e produzione dei pannelli in cartone per efficientarne il processo in chiave di sostenibilità e aumento della performance qualitative del prodotto e processo edilizio. L'estrapolazione di tali indirizzi consente di rispondere alla domanda iniziale **D.02**, ovvero di descrivere un quadro sistemico di strategie, approcci e metodi innovativi per il campo della produzione edilizia industrializzata che consentono di potenziare la sostenibilità del ciclo di vita delle costruzioni prefabbricate. Gli indirizzi strategici da implementare per la produzione industrializzata dei pannelli prefabbricati in cartone sono stati identificati attraverso la triangolazione dei dati e delle informazioni raccolte nelle Fasi 1 e 2, ovvero mettendo in relazione l'applicazione di tecniche e strumentazioni innovative (analizzate nelle schede sintetiche) con il raggiungimento degli obiettivi di efficienza e sostenibilità che si intendono traguardare (Tabella 04, colonna (a)).

Tab.04 - Parametri di valutazione dei MMC (b) individuati rispetto agli obiettivi di sostenibilità del ciclo di vita delle tecnologie (a)

Obiettivi di sostenibilità (a)		Parametri di valutazione (b)
Sostenibilità ambientale	Circolarità delle risorse e del sistema costruttivo	P.1) Il materiale strutturale può essere riciclato al termine del ciclo di vita dell'edificio mantenendo inalterate le caratteristiche prestazionali
		P.2) Il materiale strutturale è approvvigionato da fonti secondarie di riciclo
		P.3) I componenti del sistema costruttivo (pannelli, moduli) possono essere dismessi e ricollocati al termine dell'uso
	Prevedibilità di prodotto-processo	P.4) Possibilità di operare uno stretto controllo qualitativo sul prodotto finale (aderenza tra specifiche di progetto e prodotto finale)
		P.5) Possibilità di operare uno stretto controllo su tempi e costi di produzione (aderenza tra specifiche di progetto e processo reale)
	Riduzione della produzione di rifiuti	P.6) Messa in atto di specifiche strategie <i>lean</i> per l'ottimizzazione degli ordini
	Riduzione della produzione di emissioni inquinanti	P.7) Utilizzo di tecniche di lavorazione che ottimizzano l'uso del materiale, riducendo gli sprechi
		P.8) Processo di lavorazione/produzione a bassa intensità energetica
		P.9) Approvvigionamento del materiale da fonti gestite in maniera sostenibile
	Sostenibilità economica	Rapidità di intervento e di realizzazione delle opere
Semplicità di messa in opera		P.11) Riduzione dei tempi di intervento rispetto a tecnologie di costruzione tradizionali
		P.12) Possibilità di messa in opera dei componenti con l'aiuto di pochi mezzi ordinari e da parte di manodopera non specializzata
Economicità di intervento		P.13) Possibilità di stoccare e mettere in opera i componenti senza la predisposizione di specifiche opere di protezione in cantiere
Sostenibilità sociale	Flessibilità e adattabilità del progetto e dei componenti edilizi	P.14) Ottimizzazione del peso/dimensioni dei componenti per il trasporto
		P.15) Integrabilità del sistema con altre tecnologie costruttive
		P.16) Flessibilità del sistema rispetto alla necessità di configurazione spaziale; aggregabilità per la variabilità spaziale
		P.17) Integrabilità e modificabilità dei componenti successivamente alla produzione
		P.18) Possibilità di dismissione selettiva e/o di integrazione per modificare l'assetto spaziale/distributivo
	P.19) Flessibilità della produzione per accogliere istanze di personalizzazione in ottica di customizzazione di massa; riprogrammabilità della catena di produzione	
	Sicurezza e salute per i lavoratori	P.20) Riduzione della componente di manodopera richiesta nella produzione
Miglioramento della collaborazione tra le competenze e degli attori coinvolti	P.21) Adozione di un approccio gestionale integrato per mettere a sistema le diverse fasi e competenze del processo edilizio	

T.01 Unità modulari pre-assemblate

Categoria MMC

Categoria 1) Sistemi strutturali tridimensionali prefabbricati

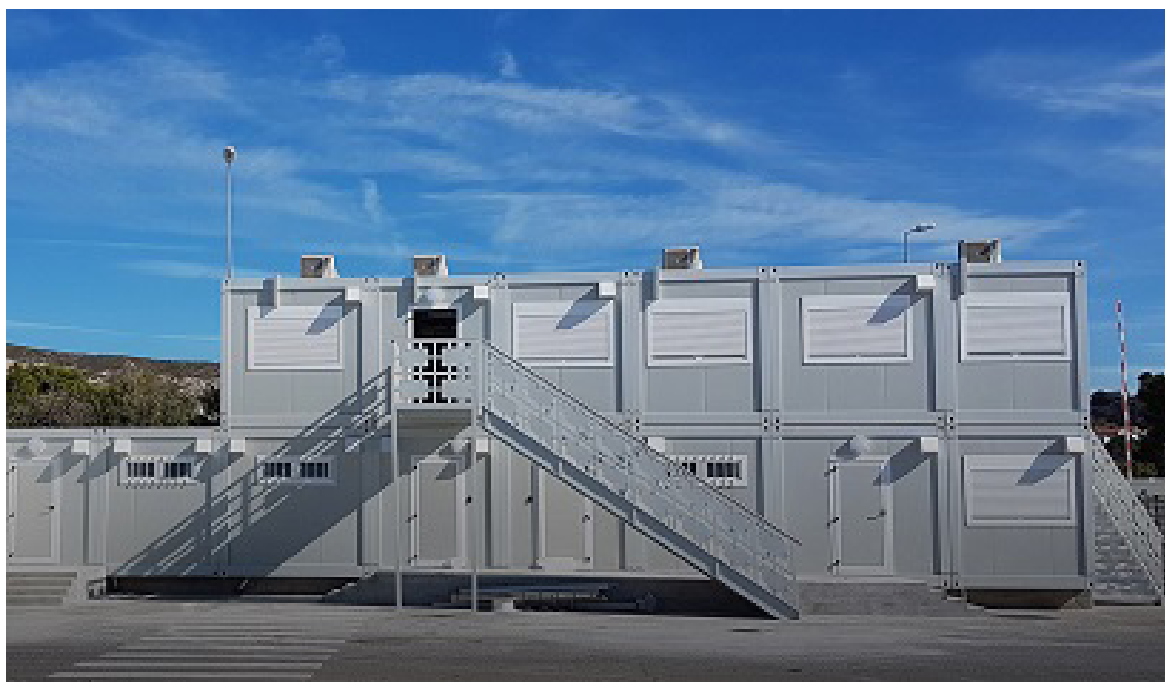


Fig.71 - Esempio di edificio realizzato attraverso l'aggregazione di unità modulari componibili (Credits: Metalbox da infobuild.com)

Descrizione

Comunemente denominate “*portable*”, tali sistemi sono ampiamente utilizzati per una varietà di usi come cantieri ed eventi, nonché per fornire soluzioni abitative di emergenza in contesti post-disastro. Il loro utilizzo è giustificato dai tempi e dai costi limitati richiesti per l’installazione, nonché dalla possibilità di combinare facilmente i moduli per assecondare esigenze di uso diversificate. Le unità modulari sono realizzate con una struttura a telaio in acciaio e pannelli sandwich coibentati per le chiusure; nonostante la loro economicità e facilità di trasporto e installazione, da un punto di vista di comfort ambientale le unità pre-assemblate di questo tipo presentano standard di vivibilità essenziali, funzionali ad ospitare funzioni solo per brevi periodi di utilizzo.



Fig.72 - Produzione industrializzata *off-site* dei componenti del sistema costruttivo secondo un approccio di standardizzazione (Credits: Newhouse® da www.newhouse.it)



Fig.73 - Aggregazione della struttura delle unità modulari all'interno dell'officina (Credits: Algeco S.p.a. da algeco.it)

Caratteristiche tecnologiche	
Livello di prefabbricazione	Fino al 95%
Flessibilità e integrabilità del sistema	Il sistema garantisce flessibilità progettuale attraverso la possibilità di aggregare e combinare i moduli anche su più piani. Tuttavia, le configurazioni spaziali risultano limitate a causa dei vincoli morfologici e dimensionali dei moduli. La tecnologia dimostra inoltre uno scarso grado di integrazione con altri sistemi costruttivi, essendo caratterizzata da un approccio a "ciclo chiuso". Dal punto di vista della modificabilità nel tempo, le unità possono essere disinstallate e/o aggiunte per assecondare la variabilità del programma spaziale.
Trasporto e installazione	Le dimensioni delle unità modulari risultano ottimizzate per il trasporto; inoltre, la maggior parte dei produttori fornisce soluzioni "flat-packed" in cui i componenti sono trasportati smontati e assemblati direttamente in sito.
Riduzione dei tempi di messa in opera	50-70%
Caratteristiche dei materiali	
Materiale strutturale	Acciaio
Fonti di approvvigionamento	L'acciaio utilizzato nella produzione delle unità impiega materie prime provenienti da fonti di riciclo, diminuendo la necessità di estrazione e lavorazione di materia vergine.
Opzioni di gestione a fine vita	Le unità modulari e i loro componenti possono essere facilmente smontati e ricollocati ciclicamente al termine dell'uso grazie all'impiego di sistemi di connessione reversibili.
Caratteristiche di produzione	
Approccio alla progettazione	---
Sequenze e tecniche di lavorazione	I componenti sono prodotti attraverso processi semi-automatizzati di formatura a freddo di profili standardizzati. L'assemblaggio avviene secondo una linea di produzione continua prevalentemente basata sulla manodopera.
Impatto ambientale della produzione	La produzione dell'acciaio risulta un processo ad alta intensità energetica e con elevata produzione di CO2.
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	Le unità modulari sono prodotte secondo un approccio di produzione seriale e standardizzata. L'approccio commerciale è di tipo Made-to-Stock (MtS), che prevede una produzione continua e lo stoccaggio in magazzino di unità complete, in previsione della loro fornitura.



Fig.74 - Trasporto di unità in modalità in una configurazione *flat-packed* per l'ottimizzazione delle fasi di trasporto (Credits: Newhouse® da www.newhouse.it)

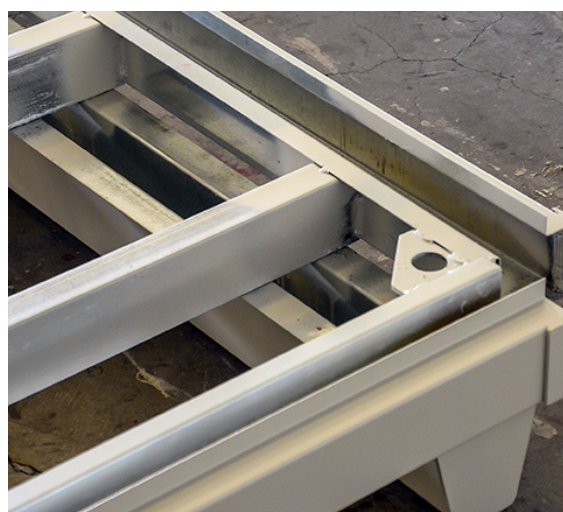


Fig.75 - Dettaglio della struttura portante delle unità componibili (basamento) (Credits: Newhouse® da www.newhouse.it)

T.02 Container ISO

Categoria MMC

Categoria 1) Sistemi strutturali tridimensionali prefabbricati

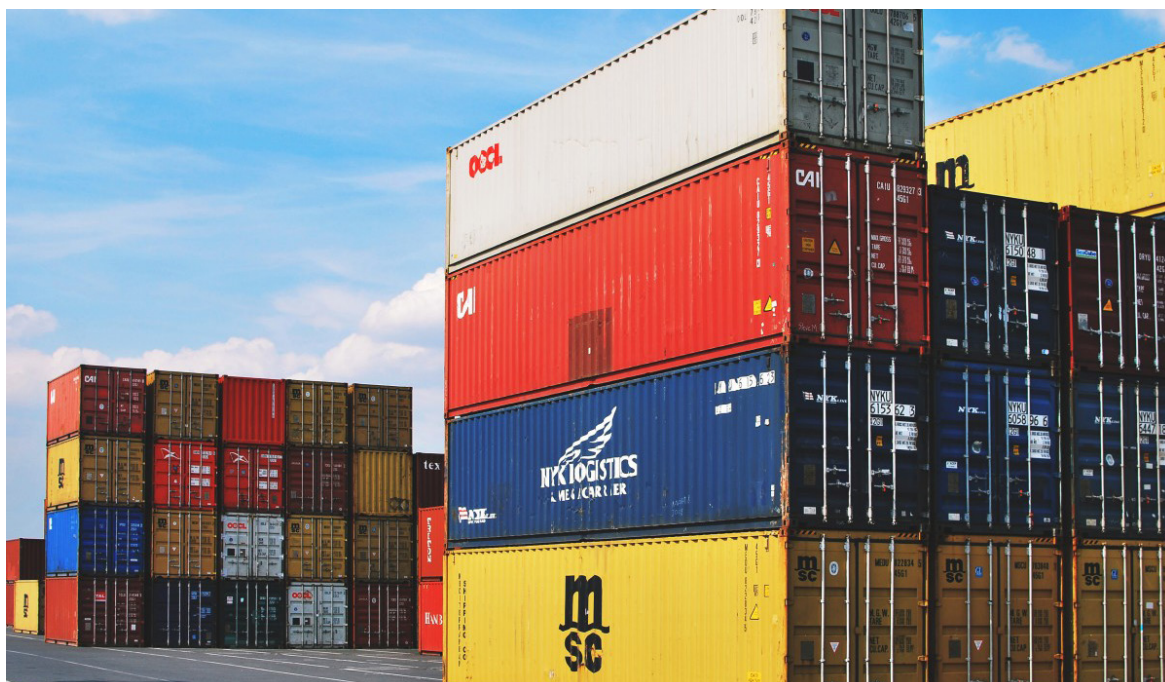


Fig.76 - Unità containerizzate ISO utilizzate nel settore dei trasporti (Credits: Creative Commons Licence da pxhere.com)

Descrizione

I container ISO sono generalmente utilizzati in tutto il mondo per il trasporto di merci, e la loro conformazione è stata standardizzata 1970 dall'International Standard Organization. In considerazione della loro capillare disponibilità, dell'economicità di acquisto (1300-3500€ circa per unità), e grazie alle caratteristiche di resistenza strutturale e aggregabilità, negli ultimi anni sono stati sempre più utilizzati anche nel settore delle costruzioni. La struttura portante è di tipo a telaio in acciaio, e nella loro conformazione standard sono chiusi da lamiere ondulate in acciaio. Tale soluzione può però essere integrata e modificata con sistemi maggiormente prestazionali, adatti per gli utilizzi come soluzione abitativa (residenziale, sociale, ecc.).

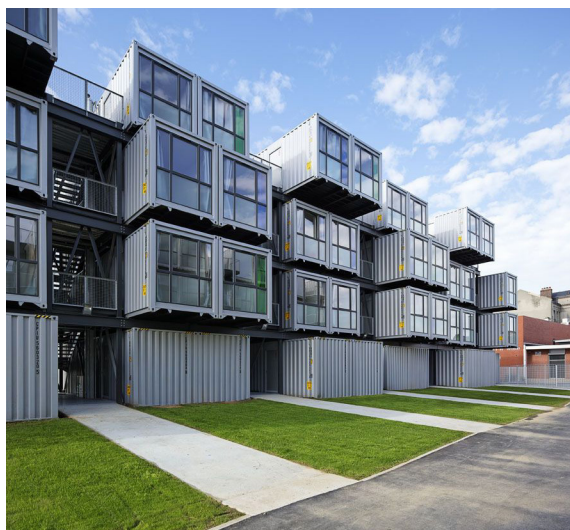


Fig.77 - Progetto del complesso residenziale Cité a Docks, Le Havre (Cattani Architects, 2010), realizzato con container ISO (Credits: © Vincent FILLON / unregard.net)

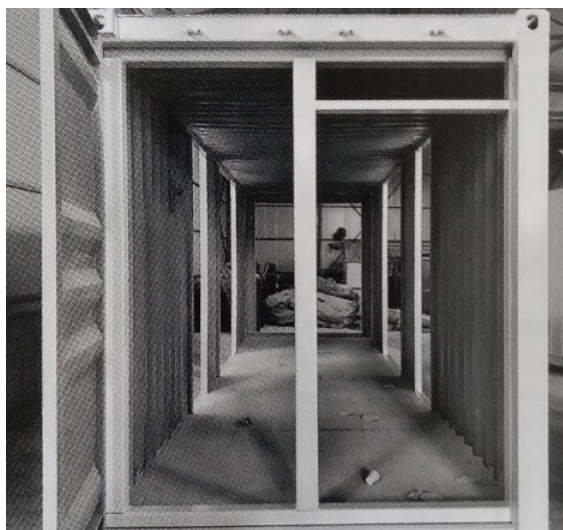


Fig.78 - Produzione off-site di container ISO (Credits: © Doone Silver Kerr da Detail, 6/2020)

Caratteristiche tecnologiche	
Livello di prefabbricazione	Fino al 95%
Flessibilità e integrabilità del sistema	Il sistema garantisce flessibilità progettuale attraverso la possibilità di aggregare e combinare i moduli anche su più piani. Tuttavia, le configurazioni spaziali risultano limitate a causa dei vincoli morfologici e dimensionali dei moduli. Le unità possono essere utilizzate anche con funzione non strutturale ad integrazione di sistemi strutturali a telaio, e possono essere completate con diversi sistemi tecnologici per le chiusure verticali e orizzontali (telai in legno, in acciaio, pannelli coibentati). Dal punto di vista della modificabilità nel tempo, le unità possono essere disinstallate e/o aggiunte per assecondare la variabilità del programma spaziale.
Trasporto e installazione	In considerazione del loro uso originale, le dimensioni dei moduli sono ottimizzate per il trasporto con mezzi diversificati (ruote, rotaia, su nave, ecc.).
Riduzione dei tempi di messa in opera	50-70%
Caratteristiche dei materiali	
Materiale strutturale	Acciaio
Fonti di approvvigionamento	L'acciaio utilizzato nella produzione delle unità impiega materie prime provenienti da fonti di riciclo, diminuendo la necessità di estrazione e lavorazione di materia vergine.
Opzioni di gestione a fine vita	Le unità modulari e i loro componenti possono essere facilmente smontati e ricollocati ciclicamente al termine dell'uso grazie all'uso di sistemi di connessione reversibili.
Caratteristiche di produzione	
Approccio alla progettazione	---
Sequenze e tecniche di lavorazione	I componenti sono prodotti attraverso processi semi-automatizzati di formatura a freddo di profili standardizzati. L'assemblaggio avviene secondo una linea di produzione continua prevalentemente basata sulla manodopera e, una volta installati in sito, i container vengono completati con le opere di finitura e integrazione dei sistemi di impianto.
Impatto ambientale della produzione	La produzione dell'acciaio risulta un processo ad alta intensità energetica e con elevata produzione di CO2.
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	Le unità modulari sono prodotte secondo un approccio di produzione seriale e standardizzata. L'approccio commerciale è di tipo Made-to-Stock (MtS), che prevede una produzione continua e lo stoccaggio in magazzino di unità complete, in previsione della loro fornitura.



Fig.79 - Edificio temporaneo per il Campus Point a Lecco, realizzato attraverso container ISO opportunamente modificati (Studio Ar.De.A di A.Montanelli, 2007-2013) (Credits: © Studio Ar.De.A.)



Fig.80 - Progetto dello studentato Qubic, realizzato aggregando container ISO (Stunionedots, 2005) (Credits: © Luuk Kramer)

T.03 Unità modulari in acciaio *Light Steel Frame (LSF)*

Categoria MMC

Categoria 1) Sistemi strutturali tridimensionali prefabbricati



Fig.81 - Sistema costruttivo a unità modulari con struttura LSF: linea di produzione industrializzata (Credits: Blox da autodesk.com)

Descrizione

Le unità modulari in acciaio sono realizzate attraverso pannelli continui a telaio leggero in acciaio (*Light Steel Frame, LSF*), ovvero formati da profili presso-piegati uniti tramite connessioni a secco. Tale soluzione permette un elevato grado di integrabilità delle componenti di impianto, permettendo di ottimizzare lo spazio a disposizione. Le unità modulari sono assemblate *off-site* secondo una linea di produzione continua, e possono essere trasportate in sito con gradi progressivi di completamento (dalla sola struttura fino all'integrazione di sistemi di chiusura e infissi).



Fig.82 - La produzione avviene secondo una catena di montaggio continua, in cui ad ogni cella corrisponde una specifica lavorazione (Credits: Blox da autodesk.com)



Fig.83 - Fasi di movimentazione e installazione di unità modulari LSF: la struttura portante deve essere dimensionata per resistere ai carichi dinamici durante la messa in opera (Credits: American Modular System da inhabitat.com)

Caratteristiche tecnologiche	
Livello di prefabbricazione	Fino al 95%
Flessibilità e integrabilità del sistema	Il sistema garantisce flessibilità progettuale attraverso la possibilità di aggregare e combinare i moduli anche su più piani. Tuttavia, le configurazioni spaziali risultano limitate a causa dei vincoli morfologici e dimensionali dei moduli. Dal punto di vista della modificabilità nel tempo, le unità possono essere disinstallate e/o aggiunte per assecondare la variabilità del programma spaziale.
Trasporto e installazione	Il dimensionamento delle unità modulari deve essere valutato in accordo alla normativa per il trasporto, in modo da limitare il ricorso a trasporti di tipo eccezionale. Ai fini della trasportabilità, le unità modulari devono essere frequentemente sovra-dimensionate per supportare i carichi dinamici, con conseguente aumento di materiale, costi e peso.
Riduzione dei tempi di messa in opera	50-70%
Caratteristiche dei materiali	
Materiale strutturale	Acciaio
Fonti di approvvigionamento	L'acciaio utilizzato nella produzione delle unità impiega materie prime provenienti da fonti di riciclo, diminuendo la necessità di estrazione e lavorazione di materia vergine
Opzioni di gestione a fine vita	Le unità modulari possono essere dismesse e ricollocate al termine dell'uso grazie all'uso di sistemi di connessione reversibili. In seguito alla dismissione, l'acciaio può essere riciclato senza perdere le sue prestazioni.
Caratteristiche di produzione	
Approccio alla progettazione	La progettazione esecutiva dei moduli e la produzione sono sviluppate secondo un approccio <i>file-to-factory</i> , ovvero a partire dalla modellazione digitalizzata dei componenti (profili, pannelli) è possibile trasferire direttamente le specifiche di fabbricazione ai macchinari a controllo numerico
Sequenze e tecniche di lavorazione	I profili in acciaio sono presso-piegati attraverso macchinari ad elevata precisione e controllo numerico. La fabbricazione avviene a partire da <i>coil</i> (stringhe a basso spessore) di materiale continuo, che permette di ridurre al minimo gli scarti di materiale. L'assemblaggio viene sviluppato secondo una catena produttiva continua, in cui ad ogni cella corrisponde una specifica operazione.
Impatto ambientale della produzione	La produzione dell'acciaio risulta un processo ad alta intensità energetica e con elevata produzione di CO2.
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	Le unità modulari vengono prodotte secondo un approccio di customizzazione di massa, ovvero a partire da elementi costruttivi standardizzati (sezioni dei profili) è possibile aggregare configurazioni personalizzate a fronte di una minima riprogrammazione della catena di montaggio. Al fine di garantire tale possibilità, le strategie commerciali maggiormente utilizzate sono quelle Assembled-to-Stock (AtS) and Made-to-Order (MtO).



Fig.84 - Catena di produzione industriale di unità di servizio (*service pods*) non strutturali (Credits: Howick Ltd da www.howickltd.com)



Fig.85 - Modulo di copertura pre-assemblato in officina (Credits: LGSF Solutions in Steel da lgsf.co.uk)

T.04 Unità modulari a telaio leggero in legno (*Platform frame*)

Categoria MMC

Categoria 1) Sistemi strutturali tridimensionali prefabbricati



Fig.86 - Unità modulari in *platform frame* utilizzate per la realizzazione di 18 alloggi ERP a Firenze (Casa Spa/Campigli Legnami, 2013) (Credits: Campigli Legnami da www.campiglilegnami.it)

Descrizione

Le unità modulari sono realizzate con una struttura a telaio leggero in legno. I moduli sono assemblati secondo una catena di montaggio continua, e vengono trasportati e installati in sito con gradi di completamento progressivi, fino all'integrazione di impianti e finiture. Nonostante sia tecnicamente fattibile, l'aggregazione in altezza si limita ad uno sviluppo fino a tre piani, oltre i quali le esigenze strutturali rendono economicamente non conveniente il ricorso a tale sistema costruttivo.



Fig.87 - Catena di produzione *off-site* industrializzata di unità modulari in legno (Credits: © Charlotta von Schultz da www.elinstallatoren.se)

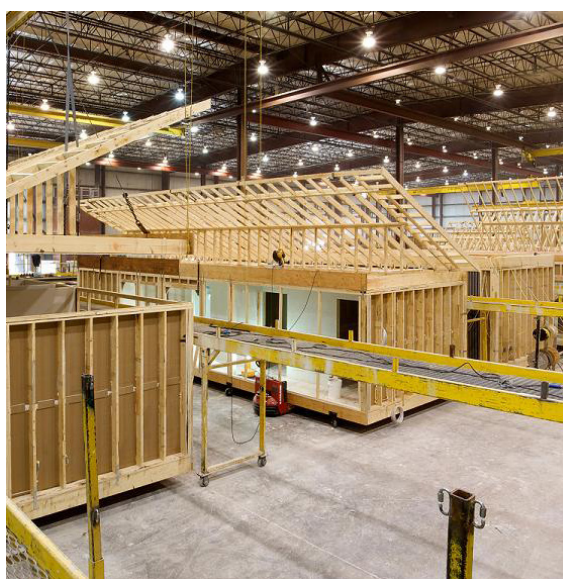


Fig.88 - Fasi di assemblaggio e completamento fuori opera delle unità modulari (Credits: Shore Modular, 2014: www.shoremouluar.com)

Caratteristiche tecnologiche	
Livello di prefabbricazione	Fino al 95%
Flessibilità e integrabilità del sistema	La configurabilità spaziale risulta parzialmente limitata in funzione di vincoli più stringenti richiesti in funzione delle prestazioni strutturali del materiale. I moduli possono essere dismessi e/o aggiunti nel tempo, seppure tale operazione richieda un'attenta progettazione ed esecuzione delle connessioni tra i moduli per evitare infiltrazioni e/o fenomeni di degrado.
Trasporto e installazione	Il dimensionamento delle unità modulari deve essere valutato in accordo alla normativa per il trasporto, in modo da limitare il ricorso a trasporti di tipo eccezionale. Ai fini della trasportabilità, le unità modulari devono essere frequentemente sovra-dimensionate per supportare i carichi dinamici, con conseguente aumento di materiale, costi e peso.
Riduzione dei tempi di messa in opera	50-70%
Caratteristiche dei materiali	
Materiale strutturale	Legno
Fonti di approvvigionamento	Il legno utilizzato per la produzione delle unità proviene da materia vergine; risulta quindi essenziale verificare l'approvvigionamento da fonti gestite in maniera sostenibile, in particolare ricercando fornitori certificati secondo protocolli standardizzati (per esempio FSC).
Opzioni di gestione a fine vita	Il tipo di connessioni utilizzate per l'installazione dei moduli compromette le possibilità di dismissione e reinstallazione dei moduli, poiché ne compromette l'integrità strutturale. Al termine del ciclo di vita, i componenti possono essere però disassemblati e il legno avviato a riciclo, seppure i prodotti ottenibili non presentano le medesime caratteristiche del materiale di partenza (<i>downcycling</i>).
Caratteristiche di produzione	
Approccio alla progettazione	La progettazione esecutiva dei moduli e la produzione sono sviluppate secondo un approccio <i>file-to-factory</i> , ovvero a partire dalla modellazione digitalizzata dei componenti (montanti e traversi, pannelli) è possibile trasferire direttamente le specifiche di fabbricazione ai macchinari a controllo numerico.
Sequenze e tecniche di lavorazione	Il profili in legno sono ottenuti dal taglio di tronchi attraverso macchinari ad elevata precisione e controllo numerico. L'assemblaggio viene sviluppato secondo una catena produttiva continua, in cui ad ogni cella corrisponde una specifica operazione.
Impatto ambientale della produzione	La lavorazione del legno è un processo a ridotto fabbisogno energetico; il materiale stesso è inoltre in grado di catturare e stoccare CO2.
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	Le unità modulari vengono prodotte secondo un approccio di customizzazione di massa, ovvero a partire da elementi costruttivi standardizzati (sezioni dei profili) è possibile aggregare configurazioni personalizzate a fronte di una minima riprogrammazione della catena di montaggio. Al fine di garantire tale possibilità, le strategie commerciali maggiormente utilizzate sono quelle Assembled-to-Stock (AtS) and Made-to-Order (MtO).



Fig.89 - Assemblaggio e completamento *off-site* delle unità modulari (Credits: Campigli Legnami da www.campigillegnami.it)



Fig.90 - Le modalità di connessione tra i moduli devono essere opportunamente progettate per garantire la reversibilità e la riutilizzabilità dei moduli (Credits: Campigli Legnami da www.campigillegnami.it)

T.05 Unità modulari *Cross Laminated Timber* (CLT)

Categoria MMC

Categoria 1) Sistemi strutturali tridimensionali prefabbricati



Fig.91 - Produzione di unità modulari con struttura CLT a Marine View Drive (Everett, WA, USA)
(Credits: © Andy Bronson/The Herald da www.heraldnet.com)

Descrizione

Le unità modulari con struttura *Cross Laminated Timber* (CLT) utilizzano una tecnologia basata su strutture monolitiche di legno a strati incrociati, che vengono prefabbricate e aggregate all'interno dell'officina per poi essere trasportate, installate e completate in sito. La tecnologia risulta particolarmente adatta per climi mediterranei, in quanto i sistemi di chiusura CLT consentono di ottenere elevati livelli di isolamento e inerzia termica. Tuttavia, proprio perché tale caratteristica è mediata dalla monoliticità delle strutture, le unità CLT risultano maggiormente onerose, rispetto ai sistemi a telaio leggero, in termini di quantità di materiale, peso e costi di produzione, trasporto e installazione.



Fig.92 - Fasi di test strutturale di soluzioni aggregative per il progetto dello Student Village a Malmesbury (WilkinsonEyre, 2020)
(Credits: © WilkinsonEyre da Detail, 6/2020)



Fig.93 - Produzione *off-site* di unità modulari con struttura CLT per un complesso di social housing (PPA Architectures, 2016) (Credits: © Philippe Ruault da www.domusweb.it)

Caratteristiche tecnologiche	
Livello di prefabbricazione	Fino al 95%
Flessibilità e integrabilità del sistema	La configurabilità spaziale risulta parzialmente limitata in funzione di vincoli più stringenti richiesti in funzione della prestazioni strutturali del materiale. I moduli possono essere dismessi e/o aggiunti nel tempo, seppure tale operazione richiede un'attenta progettazione ed esecuzione delle connessioni tra i moduli per evitare infiltrazioni e/o fenomeni di degrado. Rispetto ai sistemi a telaio, i moduli CLT presentano un grado minore di adattabilità nel tempo, in quanto – una volta progettati e realizzati – le possibili modifiche potrebbero compromettere l'integrità della struttura.
Trasporto e installazione	Il dimensionamento delle unità modulari deve essere valutato in accordo alla normative per il trasporto, in modo da limitare il ricorso a trasporti di tipo eccezionale. L'utilizzo di strutture monolitiche e il sovra-dimensionamento richiesto per supportare i carichi dinamici del trasporto risulta in un frequente aggravio di materiali e peso delle unità.
Riduzione dei tempi di messa in opera	50-70%
Caratteristiche dei materiali	
Materiale strutturale	Legno
Fonti di approvvigionamento	Il legno utilizzato per la produzione delle unità proviene da materia vergine; risulta quindi essenziale verificare l'approvvigionamento da fonti gestite in maniera sostenibile, in particolare ricercando fornitori certificati secondo protocolli standardizzati (per esempio FSC).
Opzioni di gestione a fine vita	Il tipo di connessioni utilizzate per l'installazione dei moduli compromette le possibilità di dismissione e reinstallazione dei moduli, poiché ne compromette l'integrità strutturale. Per quanto riguarda la gestione a fine vita dei materiali, l'utilizzo di collanti chimici per rendere solidali gli strati compromette le possibilità di riciclo del materiale
Caratteristiche di produzione	
Approccio alla progettazione	La progettazione esecutiva dei moduli e la produzione sono sviluppate secondo un approccio <i>file-to-factory</i> , ovvero a partire dalla modellazione digitalizzata dei pannelli è possibile trasferire direttamente le specifiche di fabbricazione ai macchinari di taglio a controllo numerico.
Sequenze e tecniche di lavorazione	Il processo di produzione avviene secondo una catena di montaggio continua a celle indipendenti, che prevede dapprima il taglio dei pannelli, attraverso macchinari a controllo numerico, quindi l'integrazione progressiva degli elementi di completamento e finitura.
Impatto ambientale della produzione	La lavorazione del legno è un processo a ridotto fabbisogno energetico; il materiale stesso è inoltre in grado di catturare e stoccare CO2.
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	Le unità modulari vengono prodotte secondo un approccio di customizzazione di massa, ovvero a partire da elementi costruttivi standardizzati (pannelli CLT) è possibile aggregare configurazioni personalizzate a fronte di una minima riprogrammazione della catena di montaggio. Al fine di garantire tale possibilità, le strategie commerciali maggiormente utilizzate sono quelle Assembled-to-Stock (AtS) and Made-to-Order (MtO).



Fig.94- Per ottimizzare e ridurre l'impatto delle fasi di trasporto, possono essere impiegate soluzioni *pop-up* dispiegabili come quella del modello MADI Home (Credits: MadiHome da madihome.com)

T.06 Unità modulari in calcestruzzo

Categoria MMC

Categoria 1) Sistemi strutturali tridimensionali prefabbricati



Fig.95 - Unità modulari prefabbricate con struttura monolitica in calcestruzzo armato (Credits: Compact Habit® da www.compacthabit.com)

Descrizione

I sistemi a unità modulari in calcestruzzo sono stati tra i primi ad essere sviluppati nell'ambito delle tecnologie di prefabbricazione tridimensionale. Tuttavia, ad oggi il sistema risulta limitatamente utilizzato nell'ambito dell'edilizia civile, in particolar modo a causa dell'elevato peso delle unità, dell'impatto ambientale del materiale e della limitata possibilità di personalizzazione delle unità. Come tutti i sistemi monolitici, anche quelli in calcestruzzo presentano buone prestazioni di isolamento e inerzia termica, rivelandosi appropriati per climi di tipo mediterraneo. Le unità modulari possono essere prodotte attraverso un getto monolitico oppure assemblando pannelli in calcestruzzo, anch'essi prefabbricati.



Fig.96 - Le unità modulari possono essere completate *off-site* con sistemi di rivestimento e chiusura (Credits: Compact Habit® da www.compacthabit.com)

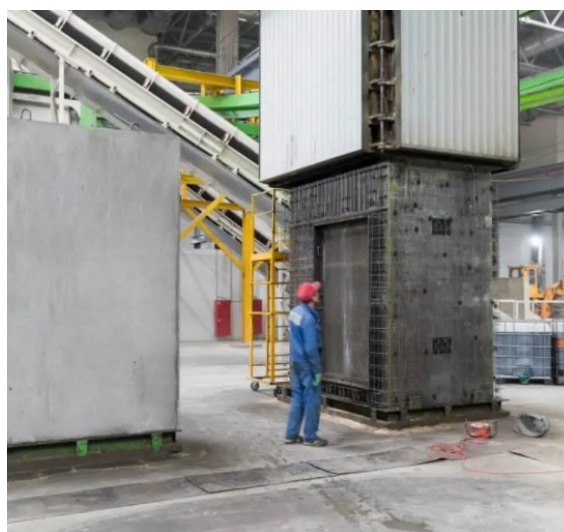


Fig.97 - Linea di produzione *off-site* di unità volumetriche in calcestruzzo: l'impiego di casseforme riutilizzabili costituisce un limite per la customizzazione del prodotto finale (Credits: Elematic da www.elematic.com)

Caratteristiche tecnologiche	
Livello di prefabbricazione	Fino al 95%
Flessibilità e integrabilità del sistema	La configurabilità spaziale risulta parzialmente limitata in funzione di vincoli più stringenti richiesti in funzione della prestazioni strutturali del materiale. Rispetto ai sistemi a telaio, quelli in calcestruzzo presentano un grado minore di adattabilità nel tempo, in quanto – una volta effettuato il getto nelle casseforme, i moduli non possono essere modificati nella loro configurazione finale.
Trasporto e installazione	Il dimensionamento delle unità modulari deve essere valutato in accordo alla normative per il trasporto, in modo da limitare il ricorso a trasporti di tipo eccezionale. La monoliticità della struttura, unita all'elevato peso specifico del calcestruzzo, comporta un elevato peso delle unità modulari, richiedendo l'utilizzo di macchinari specializzati per il sollevamento e l'installazione.
Riduzione dei tempi di messa in opera	50-70%
Caratteristiche dei materiali	
Materiale strutturale	Calcestruzzo
Fonti di approvvigionamento	Il calcestruzzo utilizzato nella produzione delle unità modulari contiene una quota parte di risorse provenienti da riciclo, in particolare da materiali da demolizione e/o scarti di produzione
Opzioni di gestione a fine vita	La possibilità di dismettere e ricollocare le unità è strettamente connessa al tipo di connessioni utilizzate per l'installazione, che devono essere selezionate per garantire la reversibilità dell'ancoraggio e mantenere l'integrità della struttura. In caso di dismissione, il calcestruzzo può essere avviato a riciclo e riutilizzato come materiale inerte per altre miscele (<i>downcycling</i>).
Caratteristiche di produzione	
Approccio alla progettazione	---
Sequenze e tecniche di lavorazione	Le unità monolitiche sono prodotte attraverso il getto di calcestruzzo in casseforme prefabbricate, quindi completate secondo una catena continua di assemblaggio.
Impatto ambientale della produzione	La lavorazione del calcestruzzo risulta un processo ad alta intensità energetica e con elevata produzione di CO2.
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	I moduli sono realizzati secondo un approccio di standardizzazione e produzione di massa; la flessibilità e variabilità del prodotto finale risultano infatti fortemente limitate dalla necessità, per ogni diversa opzione di progetto, di realizzare nuovamente le casseforme per il getto. Per l'edilizia civile, la strategia commerciale maggiormente adottata è quella di tipo Made-to-Order (Mto).



Fig.98 - Le fasi di sollevamento e installazione in sito possono comportare oneri aggiuntivi in considerazione del peso elevato delle strutture (Credits: Solidbox)



Fig.99 - Dettaglio delle modalità di ancoraggio a terra delle unità modulari (Credits: Compact Habit® da www.compacthabit.com)

T.07 Sistemi a pannelli SIP

Categoria MMC

Categoria 2) Sistemi prefabbricati a pannelli



Fig.100 - Edificio realizzato con pannelli prefabbricati SIP (Credits: ERCH2014 da it.erch2014.com)

Descrizione

I pannelli SIP (Structural Insulated Panels) sono componenti pre-ignegnerizzati e prodotti industrialmente, formati da un nucleo di materiale isolante rigido (polimeri plastici come polistirene o poliuretano) contenuto tra due elementi rigidi generalmente formati da pannelli OSB. I pannelli vengono predisposti in fabbrica con le necessarie aperture per infissi e integrazione degli impianti, e sono quindi trasportati e installati in sito attraverso sistemi di connessione a secco. La vasta diffusione della tecnologia si deve alle caratteristiche di leggerezza, facilità e velocità di messa in opera dei pannelli.



Fig.101 - La produzione dei pannelli OSB utilizzati per la chiusura del componente base utilizza le risorse di scarto dell'industria del legno (Credits: © PR Newshire)



Fig.102 - Stratigrafia composta di un pannello SIP (Credits: ERCH2014 da it.erch2014.com)

Caratteristiche tecnologiche	
Livello di prefabbricazione	Fino al 60%
Flessibilità e integrabilità del sistema	L'utilizzo di componenti bidimensionali consente di ottenere elevata flessibilità delle configurazioni spaziali. La possibilità di modifica dell'assetto spaziale nel tempo è condizionata dalla distribuzione dei carichi, e perciò richiede la previsione, in fase di progetto, delle future modalità di integrazione e/o dismissione selettiva dei componenti. L'adattamento del prodotto deve inoltre avvenire a monte della progettazione, dal momento che i pannelli non possono essere modificati successivamente alla messa in opera.
Trasporto e installazione	La leggerezza e la possibilità di impilare i pannelli consente di ottimizzare le operazioni di trasporto dalla fabbrica al sito di installazione.
Riduzione dei tempi di messa in opera	20-30%
Caratteristiche dei materiali	
Materiale strutturale	Composito
Fonti di approvvigionamento	Il nucleo di materiale isolante può essere realizzato attraverso materie plastiche di riciclo; I pannelli esterni vengono invece prodotti a partire da materiale di scarto della lavorazione del legno.
Opzioni di gestione a fine vita	Al termine del ciclo di vita dell'edificio, i pannelli possono essere disassemblati nei loro elementi costitutivi e ciascun materiale avviato a riciclo.
Caratteristiche di produzione	
Approccio alla progettazione	---
Sequenze e tecniche di lavorazione	I pannelli vengono assemblati e resi solidali attraverso pressaggio a caldo. Una volta ottenuto l'elemento-base, ciascun pannello viene tagliato attraverso macchinari a controllo numerico secondo le specifiche di progetto.
Impatto ambientale della produzione	---
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	L'elemento-base del sistema, ovvero il pannello composito, viene prodotto secondo dimensioni e configurazioni standardizzate, da cui è possibile ottenere componenti personalizzati secondo le specifiche progettuali. In questa prospettiva, l'approccio si può considerare improntato alla customizzazione di massa. Le strategie di fornitura dei pannelli sul mercato sono prevalentemente improntate al Made-to-Stock (MtS) e Assembled-to-Stock (AtS).



Fig.103 - La leggerezza e facilità di movimentazione dei pannelli ne rendono possibile la messa in opera da parte di un numero ridotto di operatori (Credits: Hobotec da it.hoboetc.com)



Fig.104 - Installazione di pannelli SIP in combinazione con una struttura a telaio in legno (Credits: Morn da www.mornglass.com)

T.08 Sistema a pannelli *Light Steel Frame (LSF)*

Categoria MMC

Categoria 2) Sistemi prefabbricati a pannelli



Fig.105 - Pannelli prefabbricati con struttura a telaio leggero in acciaio (Credits: Lightweight Building Systems, Inc. da lwbsi.com)

Descrizione

I sistemi a pannelli LSF sono tra quelli maggiormente utilizzati nel campo dell'edilizia prefabbricata, soprattutto in virtù dell'elevata versatilità e flessibilità di uso, nonché della combinazione tra ottime prestazioni meccaniche e leggerezza. I pannelli vengono prodotti assemblando profili leggeri in acciaio, a loro volta ottenuti dalla presso-piegatura di *coil* continui a basso spessore. I pannelli assicurano l'integrabilità delle componenti di impianto, e possono essere completati con sistemi di involucro diversificati per ottenere prestazioni adatte al contesto di utilizzo.

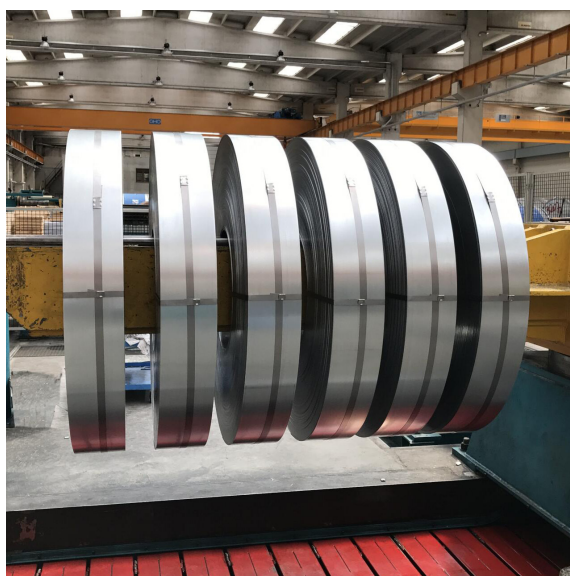


Fig.106 - I profili di acciaio sono ottenuti da *coil* continui di materiale a basso spessore, consentendo di razionalizzare il materiale e ridurre la produzione di rifiuti (Credits: Revis Robert da www.revisacciai.com)

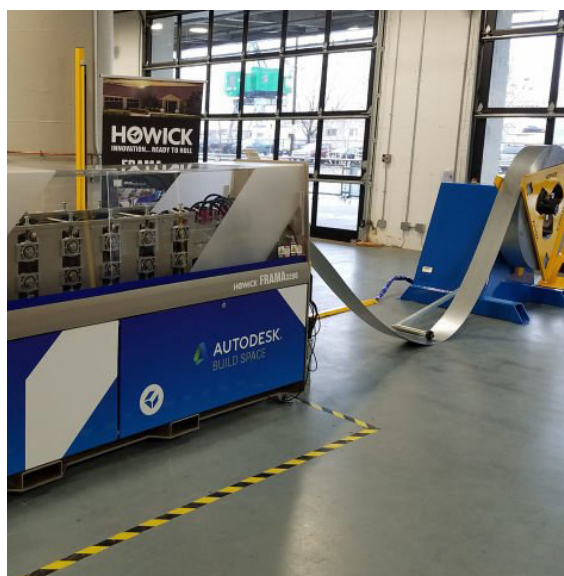


Fig.107 - Fabbricazione dei profili in acciaio a partire da stringhe di materiale continuo presso-piegate (Credits: Howick Ltd da www.howickltd.com)

Caratteristiche tecnologiche	
Livello di prefabbricazione	Fino al 60%
Flessibilità e integrabilità del sistema	L'utilizzo di componenti bidimensionali garantisce la flessibilità nelle aggregazioni spaziali, mentre la possibilità di modificare le configurazioni nel tempo deve prevedere, già in fase di progetto, le modalità di integrazione e/o dismissione selettiva dei componenti per non compromettere l'integrità strutturale dell'edificio.
Trasporto e installazione	I pannelli a telaio in legno sono caratterizzati da leggerezza e facilità di trasporto e messa in opera anche con l'ausilio di mezzi di sollevamento ordinari.
Riduzione dei tempi di messa in opera	20-30%
Caratteristiche dei materiali	
Materiale strutturale	Legno
Fonti di approvvigionamento	Il legno utilizzato per la produzione dei pannelli proviene da materia vergine; risulta quindi essenziale verificare l'approvvigionamento da fonti gestite in maniera sostenibile, in particolare ricercando fornitori certificati secondo protocolli standardizzati (per esempio FSC).
Opzioni di gestione a fine vita	Il tipo di connessioni utilizzate per l'installazione dei pannelli compromette le possibilità di dismissione e reinstallazione dei moduli, poiché ne compromette l'integrità strutturale. Al termine del ciclo di vita, i componenti possono essere però disassemblati e il legno avviato a riciclo, seppure i prodotti ottenibili non presentino le medesime caratteristiche del materiale di partenza (<i>downcycling</i>).
Caratteristiche di produzione	
Approccio alla progettazione	La progettazione la produzione dei pannelli sono sviluppate attraverso modalità <i>file-to-factory</i> , ovvero a partire dalla modellazione digitalizzata dei componenti (montanti e traversi, pannelli) è possibile trasferire direttamente le specifiche di fabbricazione ai macchinari a controllo numerico.
Sequenze e tecniche di lavorazione	I profili in legno sono ottenuti dal taglio di tronchi attraverso macchinari ad elevata precisione e controllo numerico. L'assemblaggio viene sviluppato secondo una catena produttiva continua, in cui ad ogni cella corrisponde una specifica operazione.
Impatto ambientale della produzione	La lavorazione del legno è un processo a ridotto fabbisogno energetico; il materiale stesso è inoltre in grado di catturare e stoccare CO2.
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	I pannelli sono personalizzabili secondo un approccio di customizzazione di massa, ovvero a partire da elementi costruttivi standardizzati (sezioni dei profili) è possibile aggregare configurazioni personalizzate a fronte di una minima riprogrammazione della catena di montaggio. Al fine di garantire tale possibilità, le strategie commerciali maggiormente utilizzate sono quelle Assembled-to-Stock (AtS) and Made-to-Order (MtO).



Fig.108 - Pannelli prefabbricati stoccati in officina per essere completati e trasportati in sito (Credits: LGSF Solutions in Steel da lgsf.co.uk)



Fig.109 - L'assemblaggio *off-site* dei profili permette di operare un maggior controllo sulla qualità finale del prodotto e di garantire maggior sicurezza per gli operatori (Credits: Drywall Systems Plus)

T.09 Sistemi a pannelli leggeri in legno (*Platform Frame*)

Categoria MMC

Categoria 2) Sistemi prefabbricati a pannelli



Fig.110 - Pannelli prefabbricati con struttura a telaio leggero in legno (Credits: Costantini Legno da www.costantinilegno.it)

Descrizione

La tecnologia a pannelli *platform frame* è stata sviluppata come evoluzione del sistema *balloon frame*, e prevede l'utilizzo di elementi snelli in legno (montanti) per la realizzazione di pannellature leggere, che possono essere utilizzate con funzione portante o come elementi di partizione. Grazie alla loro leggerezza, i pannelli assicurano semplicità e velocità di trasporto e messa in opera, anche attraverso l'uso di mezzi ordinari. Il sistema tecnologico si presta all'integrazione con sistemi di chiusura diversificati, in modo da ottenere prestazioni di involucro ottimali rispetto alle condizioni del contesti di installazione.

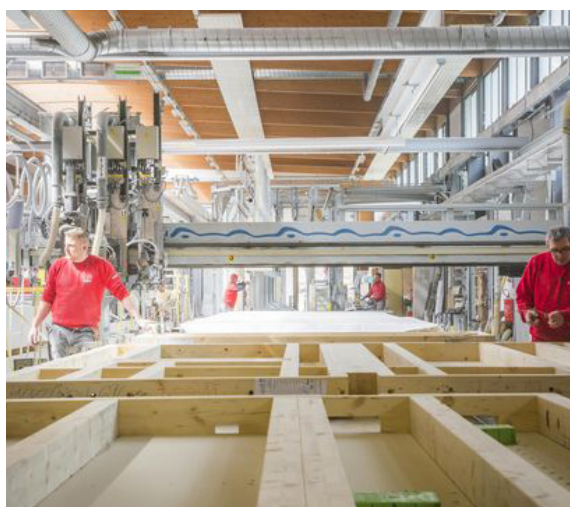


Fig.111 - Catena di produzione industrializzata di pannelli *platform frame* (Credits: Rubner Haus da www.rubner.com)



Fig.112 - Fasi di completamento *off-site* dei pannelli (Credits: Ecomotti da www.ecomotti.it)

Caratteristiche tecnologiche

Livello di prefabbricazione	Fino al 60%
Flessibilità e integrabilità del sistema	L'utilizzo di componenti bidimensionali garantisce la flessibilità nelle aggregazioni spaziali, mentre la possibilità di modificare le configurazioni nel tempo deve prevedere, già in fase di progetto, le modalità di integrazione e/o dismissione selettiva dei componenti per non compromettere l'integrità strutturale dell'edificio. Inoltre, l'adattamento dei pannelli deve essere previsto prima della produzione, possono essere modificati successivamente alla realizzazione.
Trasporto e installazione	La struttura monolitica dei pannelli comporta un aggravio nel peso degli elementi, nonché un aumento nei costi di trasporto.
Riduzione dei tempi di messa in opera	20-30%

Caratteristiche dei materiali

Materiale strutturale	Legno
Fonti di approvvigionamento	Il legno utilizzato per la produzione dei pannelli proviene da materia vergine; risulta quindi essenziale verificare l'approvvigionamento da fonti gestite in maniera sostenibile, in particolare ricercando fornitori certificati secondo protocolli standardizzati (per esempio FSC).
Opzioni di gestione a fine vita	Il tipo di connessioni utilizzate per l'installazione può compromettere le possibilità di dismissione e reinstallazione dei moduli, qualora ne vada a inficiare l'integrità strutturale. Per quanto riguarda la gestione a fine vita dei materiali, l'utilizzo di collanti chimici per rendere solidali gli strati compromette le possibilità di riciclo del materiale.

Caratteristiche di produzione

Approccio alla progettazione	Il processo di produzione dei pannelli CLT adotta un approccio <i>file-to-factory</i> , ovvero a partire dalla modellazione digitalizzata dei pannelli è possibile trasferire direttamente le specifiche di fabbricazione ai macchinari di taglio a controllo numerico.
Sequenze e tecniche di lavorazione	Il processo di produzione avviene secondo una catena di montaggio continua a celle indipendenti, che prevede dapprima il taglio dei pannelli, attraverso macchinari a controllo numerico, quindi l'integrazione progressiva degli elementi di completamento e finitura.
Impatto ambientale della produzione	La lavorazione del legno è un processo a ridotto fabbisogno energetico; il materiale stesso è inoltre in grado di catturare e stoccare CO ₂ .
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	I pannelli possono essere personalizzati in ottica di customizzazione di massa; a partire da elementi costruttivi standardizzati (pannelli CLT) è possibile modificarli secondo le esigenze del progetto a fronte di una minima riprogrammazione della catena di montaggio. Al fine di garantire tale possibilità, le strategie commerciali maggiormente utilizzate sono quelle Assembled-to-Stock (AtS) and Made-to-Order (MtO).



Fig.113 - Stazione della linea di assemblaggio e completamento dei pannelli (Credits: © Entekra Inc. da www.builderonline.com)



Fig.114 - Installazione di pannelli pre-assemblati con gli elementi di finitura e completamento (Credits: Subissati da subissati.it)

T.10 Sistema a pannelli *Cross Laminated Timber* (CLT)

Categoria MMC

CCategoria 2) Sistemi prefabbricati a pannelli

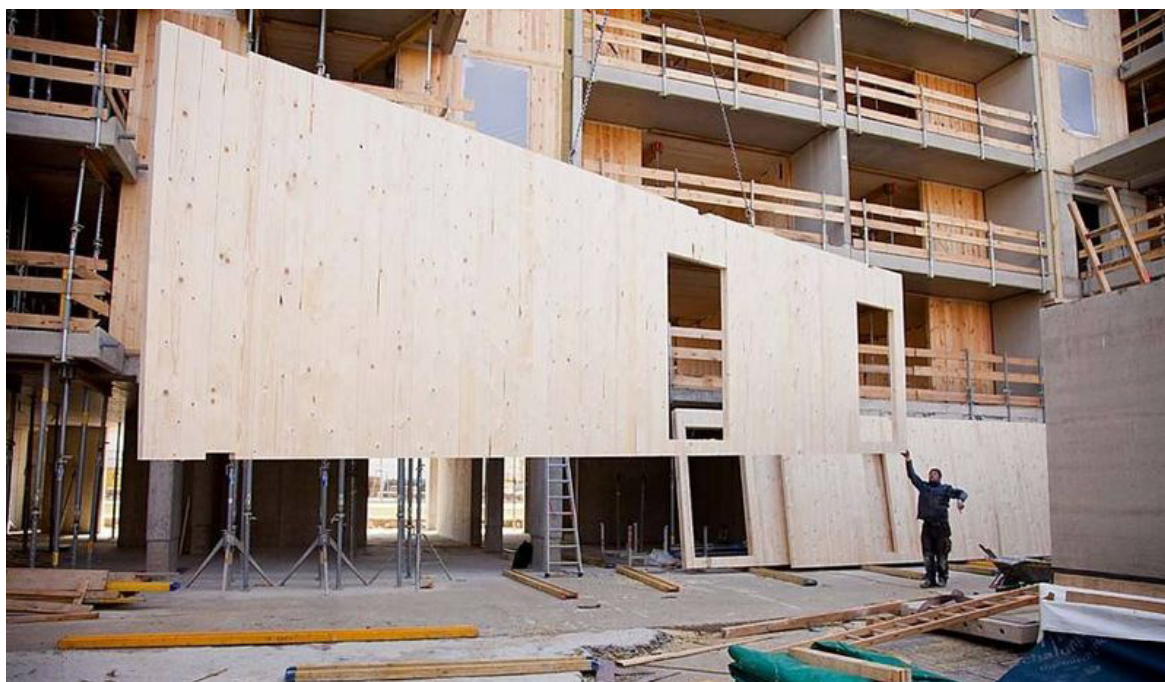


Fig.115 - Pannelli prefabbricati con struttura massiccia CLT (Credits: Moretti S.r.l. da www.moretti-legnami.it)

Descrizione

La tecnologia *Cross Laminated Timber* (CLT) sfrutta pannelli monolitici bidimensionali pre-ingegnerizzati e con funzione portante. I pannelli sono realizzati dall'incollaggio di strati incrociati di legno, resi solidali attraverso l'utilizzo di collanti chimici ad elevate resistenza. La struttura così composta presenta buone caratteristiche di isolamento ed inerzia termica, quest'ultima dovuta in particolare all'elevato peso dei pannelli. I componenti prefabbricati possono essere prodotti *off-site* con grado progressivo di completamento, dalla sola struttura portante fino all'integrazione di cablaggi e impianti, finiture interne ed esterne e infissi.



Fig.116 - Incollaggio di strati di tavole di legno a fibre incrociate per la produzione di pannelli CLT (Credits: © Davide Maria Giachino da Teknoring.com)



Fig.117 - Stazione della linea di produzione dei pannelli (Credits: Jove da jove.it)

Caratteristiche tecnologiche	
Livello di prefabbricazione	Fino al 60%
Flessibilità e integrabilità del sistema	L'utilizzo di componenti bidimensionali garantisce la flessibilità nelle aggregazioni spaziali, mentre la possibilità di modificare le configurazioni nel tempo è impedita nel caso si utilizzino pannelli che prevedono il completamento del getto in opera. Inoltre, l'adattamento dei pannelli deve essere previsto prima della produzione, possono essere modificati successivamente alla realizzazione.
Trasporto e installazione	La struttura monolitica, unita all'elevato peso del materiale, comporta un aggravio nel peso degli elementi, nonché un aumento nei costi di trasporto.
Riduzione dei tempi di messa in opera	20-30%
Caratteristiche dei materiali	
Materiale strutturale	Calcestruzzo
Fonti di approvvigionamento	Il calcestruzzo utilizzato nella realizzazione dei pannelli può contenere una percentuale di risorse provenienti da riciclo, in particolare da materiali da demolizione e/o scarti di produzione.
Opzioni di gestione a fine vita	La possibilità di dismettere e ricollocare i pannelli è strettamente legata al tipo di connessioni utilizzate per l'installazione, che devono essere selezionate per garantire la reversibilità dell'ancoraggio e mantenere l'integrità della struttura. Nel caso in cui si utilizzino pannelli pre-assemblati da completare in opera, al termine dell'uso dovrà essere prevista la dismissione. Quando ciò accade, il calcestruzzo può essere avviato a riciclo e riutilizzato come materiale inerte per altre miscele (<i>downcycling</i>).
Caratteristiche di produzione	
Approccio alla progettazione	---
Sequenze e tecniche di lavorazione	I pannelli sono realizzati attraverso il getto di calcestruzzo in casseforme prefabbricate e riutilizzabili, quindi completati secondo una catena continua di assemblaggio oppure integrati in opera con getti di completamento.
Impatto ambientale della produzione	La lavorazione del calcestruzzo risulta un processo ad alta intensità energetica e con elevata produzione di CO2.
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	La produzione dei pannelli avviene prevalentemente secondo un approccio improntato alla standardizzazione e produzione di massa; la flessibilità e variabilità del prodotto finale risultano infatti fortemente limitati dalla necessità, per ogni diversa opzione di progetto, di dover re-ingegnerizzare e realizzare le casseforme per il getto. La strategia commerciale più frequentemente adottata è quella di tipo Made-to-Order (MtO).



Fig.118 - Produzione industrializzata *off-site* dei pannelli (Credits: Novello Case da www.novellocaseinlegno.it)

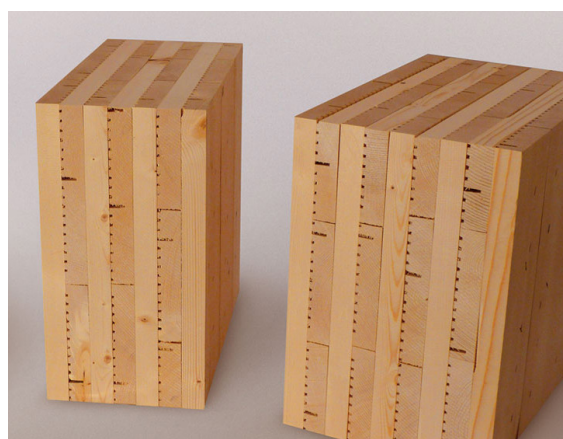


Fig.119 - Il sistema Bio-xlam® prevede l'assemblaggio a secco delle tavole di legno, eliminando le problematiche legate allo smaltimento delle colle (Credits: Lignaconstruct da lignaconstruct.com)

1.1 Sistema a pannelli in calcestruzzo

Categoria MMC

Categoria 2) Sistemi prefabbricati a pannelli



Fig.120 - Pannelli prefabbricati in calcestruzzo con tecnologia a intercapedine tralicciata in acciaio
(Credits: Detail da <https://www.detail.de/artikel/betonfertigteile-im-hochbau-8791/>)

Descrizione

Il sistema utilizza pannelli prefabbricati in calcestruzzo, realizzati industrialmente attraverso il getto di materiale all'interno di casseforme riutilizzabili. Per questo motivo, la personalizzazione del prodotto finale risulta limitata dalla necessità di dover riprogettare e realizzare le casseforme, rendendo maggiormente conveniente la produzione di componenti standardizzati. Attualmente sul mercato sono disponibili diversi tipi di pannelli prefabbricati: pannelli monolitici in calcestruzzo, pannelli *sandwich* alleggeriti con nucleo interno in materiale isolante plastico, oppure pannelli pre-assemblati con una doppia pelle in calcestruzzo e tralici interni in acciaio, da completare in opera con un getto nell'intercapedine interna.



Fig.121 - Fasi di produzione *off-site* dei pannelli prefabbricati attraverso il getto in casseforme riutilizzabili (Credits: Detail da <https://www.detail.de/artikel/betonfertigteile-im-hochbau-8791/>)



Fig.122 - Linea di produzione industrializzata dei componenti prefabbricati (Credits: Detail da <https://www.detail.de/artikel/betonfertigteile-im-hochbau-8791/>)

Caratteristiche tecnologiche	
Livello di prefabbricazione	Fino al 60%
Flessibilità e integrabilità del sistema	L'utilizzo di componenti bidimensionali garantisce la flessibilità nelle aggregazioni spaziali, mentre la possibilità di modificare le configurazioni nel tempo è impedita nel caso si utilizzino pannelli che prevedono il completamento del getto in opera. Inoltre, l'adattamento dei pannelli deve essere previsto prima della produzione, possono essere modificati successivamente alla realizzazione.
Trasporto e installazione	La struttura monolitica, unita all'elevato peso del materiale, comporta un aggravio nel peso degli elementi, nonché un aumento nei costi di trasporto.
Riduzione dei tempi di messa in opera	20-30%
Caratteristiche dei materiali	
Materiale strutturale	Calcestruzzo
Fonti di approvvigionamento	Il calcestruzzo utilizzato nella realizzazione dei pannelli può contenere una percentuale di risorse provenienti da riciclo, in particolare da materiali da demolizione e/o scarti di produzione.
Opzioni di gestione a fine vita	La possibilità di dismettere e ricollocare i pannelli è strettamente legata al tipo di connessioni utilizzate per l'installazione, che devono essere selezionate per garantire la reversibilità dell'ancoraggio e mantenere l'integrità della struttura. Nel caso in cui si utilizzino pannelli pre-assemblati da completare in opera, al termine dell'uso dovrà essere prevista la dismissione. Quando ciò accade, il calcestruzzo può essere avviato a riciclo e riutilizzato come materiale inerte per altre miscele (<i>downcycling</i>)
Caratteristiche di produzione	
Approccio alla progettazione	---
Sequenze e tecniche di lavorazione	Il pannelli sono realizzati attraverso il getto di calcestruzzo in casseforme prefabbricate e riutilizzabili, quindi completati secondo una catena continua di assemblaggio oppure integrati in opera con getti di completamento.
Impatto ambientale della produzione	La lavorazione del calcestruzzo risulta un processo ad alta intensità energetica e con elevata produzione di CO2.
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	La produzione dei pannelli avviene prevalentemente secondo un approccio improntato alla standardizzazione e produzione di massa; la flessibilità e variabilità del prodotto finale risultano infatti fortemente limitati dalla necessità, per ogni diversa opzione di progetto, di dover re-ingegnerizzare e realizzare le casseforme per il getto. La strategia commerciale più frequentemente adottata è quella di tipo Made-to-Order (MtO).



Fig.123 - Fasi di movimentazione in sito per la messa in opera dei pannelli (Credits: Huff Cutt da huffcutt.com)



Fig.124 - Struttura realizzata con pannelli prefabbricati in calcestruzzo, da integrare con getto di completamento in opera (Credits: Keegan Precast da www.keeganprecast.com)

T.12 Sistema a pannelli alveolari in cartone (PACOTEC™ Stre-wall)

Categoria MMC

Categoria 2) Sistemi prefabbricati a pannelli



Fig.125 - Sistema a pannelli prefabbricati in cartone PACOTEC™ (Credits: © Archicart®)

Descrizione

Il sistema tecnologico si basa sull'utilizzo di pannelli prefabbricati alveolari composti da tubolari in cartone ondulato, riempiti con materiale isolante sfuso, confinati tra due fogli esterni in cartone. I pannelli possono essere utilizzati con funzione strutturale per la realizzazione di pareti portanti continue e orizzontamenti, oppure come elementi di partizione interna. I pannelli sono caratterizzati da elevate leggerezza e resistenza meccanica e antisismica, nonché da buone prestazioni di isolamento termo-acustico. Grazie all'utilizzo di sistemi di connessione a secco, la tecnologia consente una rapida e semplice installazione in opera con l'ausilio di pochi mezzi ordinari e manodopera non specializzata.

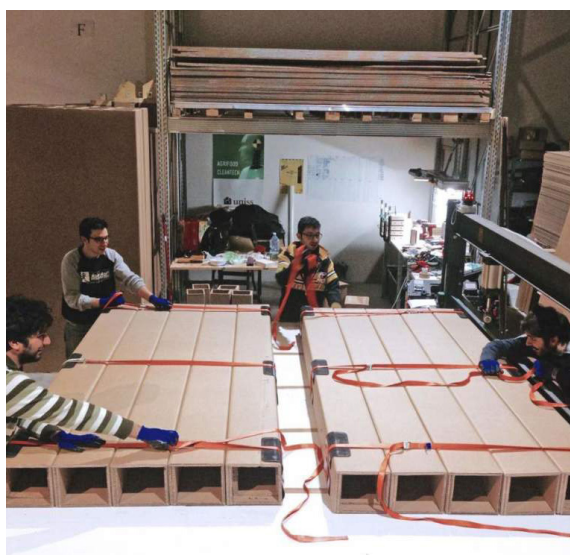


Fig.126 - Fasi di produzione *off-site* dei pannelli prefabbricati (Credits: © Archicart®)



Fig.127 - La leggerezza dei pannelli ne rende possibile la movimentazione da parte di due operatori (Credits: Foto personale, 2020)

Caratteristiche tecnologiche

Livello di prefabbricazione	---
Flessibilità e integrabilità del sistema	L'utilizzo di pannelli bidimensionali consente di ottenere una variabilità nelle configurazioni spaziali; tuttavia, la distribuzione continua dei carichi richiede di prevedere, fin dalle fasi di progetto, le eventuali modalità e strategie per la dismissione selettiva dei pannelli e/o l'integrazione di spazi. Analogamente, la personalizzazione dei pannelli deve avvenire a monte durante la progettazione, dal momento che i pannelli, una volta prodotti, non possono essere modificati.
Trasporto e installazione	Il trasporto dei pannelli risulta semplificato in virtù della leggerezza e facilità di manovra dei componenti. Durante l'installazione, particolare attenzione deve essere posta alla protezione dei pannelli dalle intemperie, prevedendo strutture temporanee di copertura.
Riduzione dei tempi di messa in opera	---

Caratteristiche dei materiali

Materiale strutturale	Cartone ondulato (carta)
Fonti di approvvigionamento	Il cartone utilizzato per la fabbricazione dei pannelli utilizza materia proveniente almeno per il 60% da fonti di riciclo. Inoltre, lo stesso processo di produzione della carta impiega risorse di scarto provenienti da pratiche di sfoltimento dei boschi.
Opzioni di gestione a fine vita	I pannelli possono essere dismessi e ricollocati ciclicamente al termine del ciclo di vita utile dell'edificio. Quando è invece prevista la dismissione, il cartone può essere avviato a riciclo ed essere reimmesso nelle stesse filiere di produzione della carta. Al fine di abilitare tale possibilità, particolare attenzione deve essere rivolta al tipo di trattamenti utilizzati, per esempio, per l'ignifugazione delle superfici esterne dei pannelli.

Caratteristiche di produzione

Approccio alla progettazione	La progettazione dei pannelli avviene secondo un approccio basato su sistemi di Computer Aided Design (CAD), che richiede l'interazione costante dei professionisti aziendali per lo sviluppo delle diverse fasi di concettualizzazione e progetto, verifica, produzione delle specifiche di fabbricazione.
Sequenze e tecniche di lavorazione	I pannelli sono prodotti a partire da fogli stesi di cartone che vengono tagliati, piegati e incollati secondo sequenze prevalentemente condotte dalla manodopera.
Impatto ambientale della produzione	La lavorazione della carta è un processo ad elevato fabbisogno energetico; tuttavia, attraverso il recupero dell'energia prodotta dalla cottura dei composti chimici, è possibile auto-sostenere la produzione rendendola di fatto un processo energeticamente autosufficiente.
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	I pannelli sono customizzati per ogni commessa di progetto; la personalizzazione risulta però onerosa a causa della necessità di aggiornare e riprogrammare le sequenze di progetto, computo e produzione. La strategia di gestione della produzione è improntata al Made-to-Order (Mto).



Fig.128 - I pannelli vengono completati *off-site* prevedendo l'insufflaggio di materiale isolante sfuso (Credits: Foto personale, 2020)



Fig.129 - Messa in opera dei pannelli prefabbricati in cartone (Credits: Foto personale, 2020)

T.13 Stampa 3D

Categoria MMC

Categoria 4) Manifattura additiva



Fig.130 - Stampa 3D di strutture monolitiche continue (Credits: © COBOD da cobod.com)

Descrizione

La tecnologia di stampa 3D applicata alla realizzazione di edifici prevede l'utilizzo di macchinari automatizzati, installati nel sito su cui sorgerà l'edificio, che depositando strati sovrapposti di materiale realizzano sistemi strutturali continui, in cui vengono integrati sistemi di armatura in acciaio per conferire resistenza a trazione. La stessa tecnologia può essere anche utilizzata per la produzione fuori opera di elementi costruttivi come pareti portanti e travi, da trasportare e installare successivamente in sito. La "fabbricazione" dell'edificio e/o delle sue parti avviene a partire dalla sua modellazione digitalizzata, le cui specifiche vengono trasferite alla stampante attraverso un opportuno linguaggio di programmazione software. I materiali utilizzabili per lo stampaggio variano da malte a base cementizia, la cui composizione deve essere studiata per garantire contemporaneamente la fluidità e la resistenza meccanica del materiale, fino a miscele naturali come argilla e terra cruda. Gli edifici realizzati con stampa 3D, grazie alla monoliticità dei sistemi di chiusura, garantiscono elevate prestazioni di isolamento e inerzia termica.



Fig.131 - Lo stampaggio può impiegare calcestruzzo o miscele naturali a base di terra cruda (Credits: © COBOD da cobod.com)



Fig.132 - Completamento della struttura portante dell'edificio (Credits: © COBOD da cobod.com)

Caratteristiche tecnologiche	
Livello di prefabbricazione	---
Flessibilità e integrabilità del sistema	La stampa 3D garantisce una elevata flessibilità delle configurazioni progettuali, consentendo anche la realizzazione di forme complesse, nonostante lo sviluppo dimensionale risulti strettamente legato al tipo e alle dimensioni (perciò alla complessità) della stampante utilizzata. Per quanto riguarda l'integrabilità nel tempo, si deve considerare che gli edifici realizzati con stampa 3D, essendo strutture monolitiche, non possono subire dismissioni e demolizioni selettive.
Trasporto e installazione	La predisposizione della stampante in sito deve prevedere l'installazione di opportune strutture temporanee di protezione. Il sito di intervento deve presentare inoltre adeguate caratteristiche di accessibilità, in modo particolare per stampanti di grandi dimensioni.
Riduzione dei tempi di messa in opera	---
Caratteristiche dei materiali	
Materiale strutturale	Composito
Fonti di approvvigionamento	I materiali utilizzabili per lo stampaggio sono diversi e possono essere selezionati anche tra miscele naturali a base di argilla e terra cruda.
Opzioni di gestione a fine vita	A causa della struttura monolitica che si viene a creare, al termine del ciclo di uso dell'edificio questo non può essere dismesso per componenti e sotto-sistemi, né è possibile il ricollocamento. I materiali possono essere quindi soltanto avviati a riciclo a seguito della demolizione.
Caratteristiche di produzione	
Approccio alla progettazione	La stampa 3D si lega intrinsecamente ad un approccio <i>file-to-machine</i> , dal momento che i macchinari utilizzati per la fabbricazione trasferiscono in sito le specifiche esecutive immesse in input a partire dalla modellazione tridimensionale degli elementi.
Sequenze e tecniche di lavorazione	Il processo di lavorazione prevede lo stampaggio in sito di interi edifici oppure in officina di parti e componenti. La stampa richiede la presenza di figure professionali altamente specializzate in grado di controllare il processo e intervenire in caso di malfunzionamenti. È comunque prevista una componente di interazione diretta degli operatori negli aspetti che riguardano l'armatura dei getti, necessaria a garantire la resistenza a flessione degli elementi costruttivi, e la rifornimento del serbatoio a cui attinge la stampante.
Impatto ambientale della produzione	La stampa 3D è un tipo di lavorazione a ridotto fabbisogno energetico e basso-emissivo.
Adattabilità e customizzazione del prodotto edilizio	Grazie alla flessibilità della tecnologia, gli edifici e componenti stampati in 3D vengono realizzati in configurazioni "su misura", secondo un approccio Engineer-to-Order (EtO)

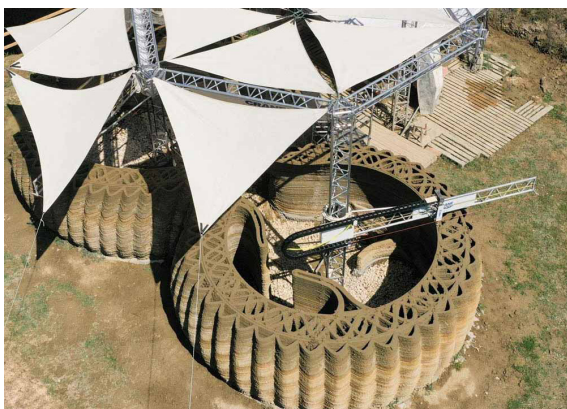


Fig.133 - Lo stampaggio in sito richiede un'opportuna pianificazione delle attrezzature e attività da svolgere (Credits: © MCA/WASP da www.3dwasp.com)



Fig.134 - L'edificio più grande stampato in 3D attraverso una stampa singola continua (Credits: © Kamp C)

5.4. Risultati

Un primo risultato ottenuto dall'analisi dei processi di prefabbricazione è un catalogo aggiornato delle attuali tecnologie edilizie industrializzate (MMC) disponibili sul mercato europeo; l'insieme consiste di una schedatura sintetica, elaborata con una struttura omogenea e comparabile, che descrive le principali caratteristiche delle tecnologie costruttive, delle risorse impiegate e dei metodi di produzione utilizzati. I contenuti descrittivi delle schede sintetizzano i più recenti contributi elaborati nell'ambito della ricerca in campo scientifico e industriale, sistematizzando la letteratura esistente sul tema. La schedatura può dunque efficacemente essere utilizzata dai *decision-makers* e operatori della filiera (progettisti, designers, produttori) nelle fasi preliminari dei processi edilizi, come uno strumento di supporto per comparare e selezionare le tecnologie costruttive sulla base del quadro esigenziale e programma edilizio da soddisfare, orientando le scelte verso obiettivi di efficienza e sostenibilità.

A partire dalla raccolta dei dati, la seconda fase dello studio ha previsto la valutazione e comparazione delle prestazioni offerte dalla tecnologia di pannelli prefabbricati in cartone (T.12) rispetto agli altri MMC, con l'obiettivo di identificarne potenzialità, limiti e domande aperte di ricerca, in previsione della sua utilizzabilità nel campo applicativo dell'infrastrutturazione scolastica di emergenza. Come descritto al **Cap. 5.2**, la valutazione è stata sviluppata rispetto a 21 parametri qualitativi, individuati come rappresentativi dell'efficienza e della sostenibilità del processo edilizio in senso ambientale, economico e sociale. I risultati dello studio (Tab.05) permettono di formulare una serie di considerazioni in merito alle prestazioni della tecnologia di pannelli prefabbricati in cartone, nonché di operare trasversalmente un raffronto sulle corrispondenze e/o divergenze rintracciate rispetto agli altri MMC.

I risultati dell'analisi dimostrano quindi come, rispetto alla sostenibilità ambientale, e in particolare alla **circolarità delle risorse (P.01, P.02, P.03)**, il cartone si caratterizza per essere uno dei materiali – tra quelli analizzati – con le migliori prestazioni in termini di circolarità del ciclo di vita. Il cartone utilizzato per la produzione dei pannelli prefabbricati proviene almeno per il 60% da carta riciclata, e può inoltre essere riciclato al termine del ciclo di vita dell'edificio (Distefano, 2019). Rispetto alle possibilità di riciclo del materiale, è opportuno considerare che i trattamenti esterni usati per la necessaria ignifugazione dei pannelli prefabbricati possono compromettere la possibilità di riciclaggio; a questo proposito, risulta importante studiare e mettere a punto soluzioni tecniche in grado sia di verificare la conformità delle prestazioni rispetto alla normativa di settore, sia di abilitare il reinserimento del materiale nel flusso di risorse, conservandone al massimo le prestazioni e le potenzialità di uso (ovvero limitando processi di *downcycling*). Un ulteriore fattore che contribuisce alla circolarità della tecnologia è rappresentato dalla possibilità di utilizzo ciclico dei componenti costruttivi (pannelli prefabbricati). Grazie all'utilizzo di tecniche reversibili di assemblaggio a secco e all'integrazione di piastre alle estremità dei pannelli, che ne preservano l'integrità strutturale dei pannelli, è possibile disassemblarli e re-installarli per più cicli di utilizzo; tale caratteristica risulta di particolare interesse nell'ambito dell'infrastrutturazione per l'emergenza, poiché asseconda la transitorietà e la variabilità nel tempo delle condizioni di intervento e assicura la trasferibilità dell'offerta spaziale in diversi contesti.

Facendo una comparazione rispetto agli altri MMC, caratteristiche di circolarità analoghe sono quelle dimostrate dall'acciaio (utilizzato nei processi T.01, T.02, T.03, T.08), un materiale che, al termine del ciclo di vita dell'edificio, può essere riciclato ciclicamente ottenendo prodotti con le medesime caratteristiche, riducendo la necessità di lavorazione della materia prima. Inoltre, anche le tecnologie dell'acciaio si basano prevalentemente sull'utilizzo di modalità di connessione reversibili, che consentono lo smontaggio e ri-assemblaggio dei componenti dell'edificio (Knaack *et al.*, 2012). Tuttavia, diversamente dal cartone, la sostenibilità ambientale dell'acciaio risulta limitata dall'impatto associato

Tab.05 - Quadro sinottico dei risultati della comparazione della tecnologia di pannelli prefabbricati in cartone (T.12) rispetto ai MMC

		Tecnologie di prefabbricazione (MMC) (c)													
Obiettivi di sostenibilità (a)	Parametri di valutazione (c)	T.01	T.02	T.03	T.04	T.05	T.06	T.07	T.08	T.09	T.10	T.11	T.12	T.13	
		Unità modulari pre-assemblate	Container ISO	Unità modulari con struttura LSF	Unità modulari platform frame	Unità modulari con struttura CLT	Unità modulari in calcestruzzo	Pannelli SIP	Sistemi a pannelli LSF	Sistemi platform frame	Sistemi a pannelli CLT	Sistemi a pannelli in calcestruzzo	Sistema a pannelli in cartone	Stampa 3D	
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE	Circolarità delle risorse e del sistema costruttivo	P.1) Il materiale strutturale può essere riciclato al termine del ciclo di vita dell'edificio mantenendo inalterate le caratteristiche prestazionali													
		P.2) Il materiale strutturale è approvvigionato da fonti secondarie di riciclo													
		P.3) I componenti del sistema costruttivo (pannelli, moduli) possono essere dismessi e ricollocati al termine dell'uso													
	Prevedibilità di prodotto-processo	P.4) Possibilità di operare uno stretto controllo qualitativo sul prodotto finale (aderenza tra specifiche di progetto e prodotto finale)													
		P.5) Possibilità di operare uno stretto controllo su tempi e costi di produzione (aderenza tra specifiche di progetto e processo reale)													
	Riduzione della produzione di rifiuti	P.6) Messa in atto di specifiche strategie lean per l'ottimizzazione degli ordini													
		P.7) Utilizzo di tecniche di lavorazione che ottimizzano l'uso del materiale, riducendo gli sprechi													
	Riduzione della produzione di emissioni inquinanti	P.8) Processo di lavorazione/produzione a bassa intensità energetica													
		P.9) Approvvigionamento del materiale da fonti gestite in maniera sostenibile													
		P.10) Utilizzo di materiale ampiamente disponibile e/o rinnovabile													
	Rapidità di intervento	P.11) Riduzione dei tempi di intervento rispetto a tecnologie di costruzione tradizionali													

		Tecnologie di prefabbricazione (MMC) (c)														
Obiettivi di sostenibilità (a)		Parametri di valutazione (b)	T.01 Unità modulari pre-assemblate	T.02 Container ISO	T.03 Unità modulari con struttura LSF	T.04 Unità modulari platform frame	T.05 Unità modulari con struttura CLT	T.06 Unità modulari in calcestruzzo	T.07 Pannelli SIP	T.08 Sistemi a pannelli LSF	T.09 Sistemi platform frame	T.10 Sistemi a pannelli CLT	T.11 Sistemi a pannelli in calcestruzzo	T.12 Sistema a pannelli in cartone	T.13 Stampa 3D	
SOSTENIBILITÀ ECONOMICA	Semplicità di messa in opera	P.12) Possibilità di messa in opera dei componenti con l'aiuto di pochi mezzi ordinari e da parte di manodopera non specializzata														
		P.13) Possibilità di stoccare e mettere in opera i componenti senza la predisposizione di specifiche opere di protezione in cantiere														
	Economicità	P.14) Ottimizzazione del peso/dimensioni dei componenti per il trasporto														
SOSTENIBILITÀ SOCIALE	Flessibilità e adattabilità del progetto e dei componenti edilizi	P.15) Integrabilità del sistema con altre tecnologie costruttive														
		P.16) Flessibilità del sistema rispetto alla necessità di configurazione spaziale; aggregabilità per la variabilità spaziale														
		P.17) Integrabilità e modificabilità dei componenti successivamente alla produzione														
		P.18) Possibilità di dismissione selettiva e/o di integrazione per modificare l'assetto spaziale/distributivo														
		P.19) Flessibilità della produzione per accogliere istanze di personalizzazione in ottica di customizzazione di massa; riprogrammabilità della catena di produzione														
	Sicurezza e salute	P.20) Riduzione della componente di manodopera richiesta nella produzione														
Miglioramento collaborazione	P.21) Adozione di un approccio gestionale integrato per mettere a sistema le diverse fasi e competenze del processo edilizio															

all'estrazione e lavorazione della materia prima, un processo che richiede un'elevata intensità energetica e ha un elevato potenziale emissivo di sostanze inquinanti. Le stesse considerazioni valgono per le tecnologie del calcestruzzo, un materiale che, pur potendo essere ottenuto da fonti di riciclo e riciclabile a fine vita (*downcycling*), deriva da processi di lavorazione energivori, con elevati livelli di emissioni inquinanti (Smith, 2010). La circolarità delle tecnologie basate sul calcestruzzo è inoltre ridotta a causa dell'impossibilità riutilizzare i componenti dei sistemi costruttivi, che al termine dell'uso devono necessariamente essere dismessi e avviati a riciclo. Lo stesso limite si rintraccia nel caso delle tecnologie di stampa 3D (T.13) che, basandosi su sistemi monolitici, non consentono il ricollocamento dell'edificio in un luogo diverso da quello di realizzazione.

Rispetto invece alle tecnologie del legno (T.04, T.05, T.09, T.10), l'analisi ne dimostra limitati potenziali di circolarità rispetto alla tecnologia in cartone. Le applicazioni costruttive richiedono caratteristiche di qualità tali dei componenti da rendere necessario l'uso di materia prima vergine, nonostante siano oggi disponibili stringenti protocolli di certificazione volti ad accertare che la gestione dei boschi avvenga in maniera sostenibile, addirittura contribuendo alla crescita delle foreste (Lehmann, 2013). La circolarità complessiva delle tecnologie in legno è però limitata dalla difficoltà nella dismissione e riutilizzo ciclico dei componenti costruttivi, causata dall'utilizzo di tecniche di fissaggio e sigillatura che compromettono l'integrità strutturale e le possibilità di reinstallazione dei componenti. Al termine del ciclo di vita inoltre, il riciclo del legno è possibile solo a fronte di una perdita di prestazioni, ovvero ottenendo prodotti con qualità nettamente inferiori (*downcycling*).

Per quanto attiene alla **prevedibilità del prodotto e processo edilizio (P.4, P.5)**, dall'analisi emerge come la possibilità di controllo nella fabbricazione dei pannelli in cartone sia una delle maggiori problematiche associate all'impostazione attuale del progetto e della produzione. Da un punto di vista operativo e strumentale, tale incapacità di previsione sugli esiti del processo (performance del prodotto, tempi e costi di realizzazione) risulta come conseguenza di un approccio alla progettazione scarsamente integrato, improntato prevalentemente all'uso di strumenti per il Computer Aided Design (CAD), che richiede una elevata componente di interazione da parte dei professionisti per l'aggiornamento della documentazione, il calcolo delle quantità, la stima dei costi, ecc. Per quanto attiene invece alla fabbricazione dei componenti, il processo risente di una impostazione prevalentemente basata sulla manodopera; le operazioni di taglio, cordonatura e incollaggio dei fogli vengono infatti eseguite manualmente dagli addetti di produzione, rendendo il processo vulnerabile rispetto al rischio di errori e incongruenze sul prodotto finale, prolungamento dei tempi e dei costi di produzione.

Al contrario, la maggior parte dei MMC analizzati dimostrano spiccate potenzialità per quanto riguarda la qualità del processo di prefabbricazione. Nello specifico, tali possibilità risultano abilitate dall'utilizzo di approcci *file-to-factory/ file-to-machine* che, attraverso l'utilizzo di sistemi BIM e CAD-CAM riescono a interconnettere e operare un trasferimento diretto tra le fasi di progettazione e produzione dei componenti, limitando il rischio di perdita di informazioni e garantendo la coerenza tra le specifiche di progettazione e le prestazioni del prodotto finale. Il controllo è inoltre potenziato dall'uso di macchinari ad elevata precisione, come CNC o stampanti 3D, che assicurano l'aderenza degli elementi costruttivi prodotti rispetto alle specifiche elaborate in fase di progetto (Forcael *et al.*, 2020).

Per quanto attiene all'obiettivo di **riduzione dei rifiuti (P.6, P.7)**, il processo di produzione dei presenta delle potenzialità per la messa in atto di una produzione improntata a "zero rifiuti"; i fogli di cartone da cui si ottengono i pannelli vengono infatti acquistati da fornitori esterni, e possono essere ordinati sulla base delle dimensioni esatte richieste della configurazione finale dei pannelli, riducendo al minimo lo sfrido di materiale. Tale strategia non risulta

però attualmente adottata, poiché la strategia di gestione del magazzino prevede l'acquisto di batch di fogli di cartone di dimensioni omogenee. L'approccio è giustificato da una difficoltà nella previsione e programmazione esecutiva della produzione, a sua volta connessa con l'attuale impostazione gestionale del progetto-produzione, come analizzato precedentemente. Per questo motivo, il magazzino viene attualmente rifornito senza tenere conto di quella che sarà l'effettiva produzione dei pannelli, risultando in un aumento degli scarti di materiale durante la produzione.

Un approccio di riferimento per quanto riguarda l'ottimizzazione del materiale è invece quello adottato nei processi di fabbricazione delle tecnologie in acciaio LSF (T.01, T.02, T.03, T.08). I profili vengono infatti prodotti a partire da bobine di acciaio che hanno dimensione standardizzata e ottimizzata secondo le dimensioni finali dell'elemento costruttivo, e – una volta presso-piegati e tagliati a misura – si producono minimi scarti di produzione.

Per quanto riguarda l'organizzazione gestionale, la produzione di cartone è attualmente improntata ad un modello Made-to-Order (MtO), in cui la produzione dei componenti è avviata contestualmente agli ordini. Tale approccio si rivela funzionale ad evitare l'accumulo di componenti finiti e inutilizzati in magazzino, con vantaggi che riguardano sia la sostenibilità ambientale che economica del processo: limitazione degli sprechi dovuti a materiali danneggiati, ridotti costi di manutenzione, razionalizzazione dello spazio di lavoro. Rispetto inoltre agli approcci di tipo Made-to-Stock (MTS) o Assembled-to-Stock (AtS) (T.01, T.02, e T.07), la produzione risulta maggiormente flessibile per assecondare esigenze di customizzazione del prodotto, poiché le specifiche dei pannelli possono essere progettate specificamente sulla base delle esigenze della committenza, anche se la personalizzazione, come verrà approfondito di seguito, richiede uno sforzo maggiore rispetto agli altri MMC. Inoltre, considerando l'applicabilità della tecnologia in contesti emergenziali, si deve considerare che un approccio di tipo MtO deve essere supportato da una organizzazione e capacità produttiva tali da riuscire ad assecondare la richiesta di grandi volumi di produzione in breve tempo per rispondere rapidamente alle esigenze di infrastrutturazione.

Rispetto alla **riduzione dell'impatto ambientale associato alla produzione di emissioni inquinanti (P.8, P.9, P.10)**, nell'ambito della ricerca scientifica non sono stati ad oggi condotti studi specifici sul processo di produzione della tecnologia di pannelli in cartone. Tuttavia, dalle indagini preliminari è stato possibile analizzare le prestazioni ambientali inerenti alla produzione del cartone, il materiale alla base del processo T.12. Si è quindi osservato come la lavorazione della carta, pur essendo un processo con elevato fabbisogno energetico, grazie al recupero dell'energia prodotta in fase di cottura delle materie prime, riesce ad essere energeticamente autosufficiente. Un'ulteriore riduzione delle emissioni è resa inoltre possibile dall'utilizzo di materie riciclate, che consentono di valorizzare il contenuto energetico catturato dai prodotti durante i cicli precedenti di lavorazione.

Analizzando gli aspetti di **messa in opera** dei pannelli in cartone, la rapidità di intervento e la riduzione dei tempi di messa in opera rispetto alle tecnologie di costruzione tradizionali (**P.11**) risulta compatibile con le altre tecnologie di prefabbricazione per sistemi bidimensionali (Categoria 2), ed è resa possibile dalla leggerezza e facilità di movimentazione dei pannelli, che possono essere installati senza l'ausilio di macchinari complessi e da parte di un numero ridotto di operatori, così come dall'utilizzo di sistemi di connessione a secco, che permettono di ridurre ulteriormente i tempi necessari all'assemblaggio dei pannelli in sito. La possibilità di installazione senza l'impiego di attrezzature pesanti e/o altamente specializzate garantisce inoltre l'utilizzabilità del sistema in contesti emergenziali, oltre che limitare l'impatto del cantiere sulle attività circostanti. Al contrario, tecnologie come la stampa 3D (T.13) o i sistemi a unità modulari (T.01-T.06) necessitano di attrezzature di cantiere maggiormente onerose, che pongono una serie di limiti per l'accessibilità ai siti di intervento e presuppongono costi di installazione maggiori per l'impiego di

strumentazioni e manodopera altamente specializzate (Perrot *et al.*, 2018). Rispetto alla messa in opera dei pannelli in cartone, una delle problematiche rilevate è la necessità di proteggere i componenti costruttivi durante lo stoccaggio in sito, in attesa dell'installazione e completamento degli elementi di finitura, attraverso l'installazione di strutture temporanee per riparare i pannelli dagli agenti atmosferici. Una criticità che può essere affrontata sia prevedendo la predisposizione in officina degli elementi di protezione, sia attraverso un'attenta crono-programmazione del cantiere, ovvero sincronizzando le attività di installazione con l'arrivo dei pannelli.

Per quanto attiene agli **aspetti economici (P.12-P.14)**, si è premesso che per lo scopo dell'analisi non sono stati valutati i costi unitari delle tecnologie, poiché risultano strettamente dipendenti dal contesto produttivo e dal luogo di installazione. L'economicità della costruzione è stata dunque valutata in riferimento alla possibilità di ottimizzare il trasporto dei componenti, che risulta come uno dei parametri maggiormente influenti nel costo totale delle opere prefabbricate. Con queste premesse, dall'indagine come i sistemi a pannelli prefabbricati (MMC Categoria 2, T.07-T.12) risultano una soluzione ottimizzata rispetto al trasporto; la possibilità di impilare i pannelli minimizza la necessità di trasporti multipli, riducendo l'impatto economico del trasporto dei componenti (Knaack *et al.*, 2012). Al contrario, per le unità modulari prefabbricate (MMC Categoria 1, T.01-T.06) la necessità di trasportare volumi vuoti aumenta l'entità dei costi delle opere, in particolar modo quando devono essere previsti carichi eccezionali (dimensioni eccedenti i limiti di legge) e per trasporti a lunga distanza. Inoltre, nel caso di unità volumetriche, la struttura portante deve essere sovra-dimensionata per sostenere i carichi dinamici durante il trasporto, causando un aumento dei materiali e perciò dei costi delle opere. Per queste ragioni, i sistemi a pannelli bidimensionali come quello in cartine risultano una scelta preferibile per l'intervento in contesti di emergenza, al fine di razionalizzare le risorse e garantire la tempestività di intervento anche in siti a ridotta accessibilità.

Rispetto alle **possibilità di adattamento del progetto e della costruzione (P.15-P.19)**, dall'analisi emerge come i sistemi a pannelli bidimensionali (Categoria 2, T.07-T.12) consentano una maggiore configurabilità dello spazio rispetto ai sistemi a unità volumetriche (Categoria 1, T.01-T.12), poiché i pannelli possono essere aggregati in configurazioni multiple, non vincolate alla ripetizione di un modulo standardizzato – seppur customizzabile – per forma e dimensioni (P.16). Ciononostante, si deve notare che proprio la serialità del concept spaziale abilita una maggiore adattabilità nel tempo degli edifici, dal momento che singole unità, strutturalmente indipendenti, possono essere dismesse e/o aggiunte senza pregiudicare l'integrità della costruzione (P.18) (Mapston e Westbrook, 2010; Smith, 2010; Knaack *et al.*, 2012). In questa prospettiva, l'utilizzo di pannelli bidimensionali come quelli in cartone richiede una più attenta previsione, fin dalla fase di progetto, sulle possibilità e modalità di adattamento futuro della costruzione. Un'efficace strategia è quella di concepire l'aggregazione spaziale come una serie di unità ambientali funzionalmente e tecnologicamente indipendenti, in modo che sia possibile dismettere e/o integrare spazi pur mantenendo la funzionalità dell'edificio nella sua interezza. Per quanto riguarda la possibilità di modificare i componenti dopo la fabbricazione (P.17), l'indagine mostra come per tutti i sistemi siano possibili solo limitate integrazioni dopo la produzione dei componenti, soprattutto quando questi sono assemblati a partire da pezzi prodotti su misura. Tale vincolo è una caratteristica intrinseca della prefabbricazione industriale degli edifici che, seppur richiede una precisa verifica delle soluzioni progettuali, si pone a garanzia della qualità finale dell'opera, garantendo il rispetto delle prestazioni e delle qualità tecnologico-costruttive del prodotto edilizio.

Per quanto riguarda le **possibilità di customizzazione** dei pannelli in cartone (P.19), l'analisi dimostra che, a fronte dell'attuale impostazione del processo, la personalizzazione del prodotto è possibile solo a fronte della riproget-

tazione e verifica manuale delle caratteristiche dei componenti (prestazioni, istruzioni per la fabbricazione, computo), che presuppone un aumento dei tempi e costi di sviluppo. I modelli organizzativi a cui riferirsi per implementare la flessibilità del processo sono quelli che adottano un approccio *file-to-factory*, per esempio i processi di produzione delle tecnologie LSF (T.03, T.08) o la stampa 3D (T.13), che sfruttando la digitalizzazione delle informazioni per mettere in connessione diretta gli strumenti di progetto (per esempio software BIM) con i macchinari di lavorazione. Il *workflow* che deriva da questa impostazione risulta automaticamente riconfigurabile in funzione della customizzazione delle specifiche di progetto, mantenendo i costi di una produzione *bespoke* allineati a quelli della produzione in serie (customizzazione di massa).

Con riferimento agli aspetti di **salute e sicurezza per i lavoratori (P.20)**, come già osservato l'impostazione prevalentemente manuale delle sequenze di fabbricazione espone i lavoratori ad un maggiore rischio di infortuni e incidenti, che potrebbe essere ridotto adottando sistemi e metodi di tipo automatizzato e digitalizzato. Le strategie di informatizzazione del processo edilizio, attualmente carenti nella prefabbricazione dei pannelli in cartone, consentirebbero inoltre di potenziare gli aspetti relativi all'**integrazione e collaborazione** tra le fasi e competenze coinvolte nel processo edilizio **(P.21)**.

5.5. Discussione

L'analisi ha inteso analizzare e verificare le prestazioni prodotte dalla tecnologia **PACOTEC™ Stre-wall** di pannelli prefabbricati in cartone rispetto all'applicabilità nella realizzazione di spazi scolastici emergenziali. Lo studio ha previsto la comparazione tra le performance della tecnologia con 12 processi di MMC utilizzati in ambito europeo, con l'obiettivo di operare un confronto tra i diversi sistemi ed estrapolare, in positivo, gli indirizzi per l'efficientamento della qualità e della sostenibilità della tecnologia in cartone. L'analisi ha preso in considerazione 21 parametri qualitativi, rappresentativi della sostenibilità del processo edilizio, che hanno analizzato e comparato le caratteristiche intrinseche dei materiali impiegati, della tecnologia costruttiva e del processo di progettazione e produzione.

I risultati dello studio confermano la corrispondenza della tecnologia prefabbricata in cartone rispetto al quadro esigenziale che si è individuato per l'intervento nei contesti emergenziali, in termini di efficienza costruttiva e di sostenibilità ambientale del ciclo di vita dei manufatti. In particolare, i principali elementi di positività che emergono rispetto agli altri MMC, e che consentono di rispondere alla domanda **D.01**, sono:

- **Rapidità e semplicità di installazione:** i pannelli possono essere sollevati, manovrati e assemblati in sito da un ridotto numero di operatori non specializzati, con l'aiuto di mezzi e attrezzature ordinarie. La facilità di installazione rende possibili anche processi di auto-costruzione che, nell'ambito emergenziale, promuovono la partecipazione attiva della comunità nei processi di ripresa sociale ed economica;
- **Economicità:** seppure i costi delle tecnologie dipendano strettamente da un insieme di fattori contestuali, se valutata rispetto all'ottimizzazione delle operazioni di fornitura, la tecnologia consente di razionalizzare i costi e l'impatto associati al trasporto;
- **Riduzione dell'impatto ambientale del ciclo di vita:** il cartone ondulato presenta un ridotto impatto ambientale durante le fasi di approvvigionamento e lavorazione. Si tratta inoltre di una materia a base naturale, e il cartone utilizzato per la fabbricazione dei pannelli proviene almeno per il 60% da fonti di riciclo, oltre a poter essere riciclato al termine dell'uso. L'impatto ambientale dei manufatti scolastici realizzati con la tecnologia in cartone può

essere ulteriormente ridotto in considerazione della possibilità di dismettere e riassemblare i pannelli ciclicamente, prolungandone il ciclo di vita utile;

- **Configurabilità spaziale:** i pannelli possono essere assemblati in numerosi *layout* spaziali, a differenza delle unità modulari, permettendo di rispondere alle esigenze di caratterizzazione dei diversi ambienti e di stimolo spaziale per gli utenti;
- **Comfort e qualità ambientale:** le ricerche già sviluppate sulla tecnologia (Distefano, 2019; Distefano *et al.*, 2018; Latka, 2017) hanno dimostrato gli elevati livelli prestazionali, termo-igrometrici e acustici dei pannelli prefabbricati in cartone, che consentono di verificare gli standard minimi richiesti dalla normativa di settore (Decreto CAM).

Confrontando questo elenco con il quadro esigenziale della **Pt. I, Cap. 2.8**, emerge tali qualità della tecnologia rispondano puntualmente ai requisiti dell'intervento emergenziale nell'ambito dell'edilizia scolastica. Gli attuali elementi di criticità che ostacolano l'effettiva implementazione della tecnologia risiedono nel modello organizzativo adottato per la produzione *off-site* dei pannelli, che limita i potenziali di efficienza nella risposta (velocità e volumi di produzione), qualità del prodotto finale e ottimizzazione delle risorse. Nello specifico, le principali problematiche emerse riguardano:

- **Scarsa integrazione e limitato controllo della qualità del prodotto-processo:** l'attuale impostazione progettuale e produttiva risulta basata su approcci artigianali, che richiedono un'elevata interazione degli operatori nelle fasi di sviluppo, ingegnerizzazione e produzione dei pannelli. La progettazione dei componenti avviene attraverso software CAD, e presuppone lo sforzo dei tecnici per definire le specifiche esecutive e verificare la presenza di errori e interferenze. Le ricadute sono uno scarso controllo della qualità del prodotto finale, ovvero un'elevata probabilità che non vi sia corrispondenza tra le specifiche di progetto e le performance del prodotto finale. Tale rischio è esacerbato da un'ulteriore indeterminazione nelle fasi di produzione, in cui il controllo qualitativo è demandato agli operatori che si occupano di tagliare, cordonare e assemblare i fogli di cartone. La scarsa automazione e digitalizzazione del processo coinvolge anche gli aspetti organizzativi e gestionali della progettazione. In particolare, le fasi di computazione delle quantità e dei costi, così come gli ordini del materiale, sono gestiti attraverso fogli di calcolo che richiedono un costante aggiornamento manuale da parte degli operatori. Questo si risolve in una limitata capacità di controllo della complessità del processo, aumentando il rischio di superare tempi e costi stabiliti dal programma edilizio. Inoltre, l'impostazione organizzativa della progettazione basata su sistemi CAD non consente di attivare processi collaborativi con le altre competenze necessariamente coinvolte nel processo (consulenti esterni per gli aspetti strutturali, energetici, ecc., committenze pubbliche e/o private), a cui consegue un prolungamento dei tempi necessari alle verifiche, l'impoverimento dei contenuti informativi del progetto, e la necessità di aggiornamento costante della documentazione;
- **Rigidità della produzione:** i limiti individuati confluiscono in un'altra delle criticità intrinseche del processo attuale, ovvero la scarsa adattabilità della produzione dei confronti delle esigenze di customizzazione dei componenti. Ogni modifica sul prodotto finale richiede un'onerosa riprogrammazione di tutte le sequenze di progettazione, ingegnerizzazione e produzione delle specifiche esecutive, propedeutiche alla fabbricazione dei componenti. La personalizzazione avviene quindi a fronte di elevati costi di progetto e sviluppo, rendendo economicamente più conveniente la produzione di componenti standardizzati;
- **Spreco di risorse e produzione di rifiuti:** i fogli di cartone utilizzati per la produzione dei pannelli vengono acqui-

stati da sub-fornitori in *batch* di dimensioni omogenee (3100 x 2400 mm), che non tengono conto delle effettive dimensioni dei pannelli. In questo modo, quando non è possibile ottimizzare il taglio degli elementi, ricavando cioè più pezzi da un unico foglio di cartone, gran parte del materiale viene sprecato, oppure deve essere stoccato, in mano sicuro e organizzato, in attesa di poterlo riutilizzare per altre commesse;

- **Insicurezza per i lavoratori nelle fasi di produzione dei componenti:** le sequenze di fabbricazione e assemblaggio dei componenti in officina, essendo prevalentemente basate sulla manodopera, espongono i lavoratori ad un rischio maggiore di infortuni e incidenti, vanificando in parte i benefici derivanti dalla produzione fuori opera dell'edificio.

A partire da tali elementi di debolezza, il confronto e la triangolazione dei dati sulle performance di efficienza e sostenibilità degli altri MMC ha permesso di individuare una serie di macro-indirizzi e linee-guida che, rispondendo alla domanda **D.02**, rappresentano un insieme di strategie, da implementare nella progettazione e produzione di pannelli prefabbricati in cartone, per incrementare la qualità, l'efficienza e la sostenibilità del prodotto-processo edilizio. In particolare, le direzioni di ricerca che si sono individuate sono:

- **Digitalizzazione delle fasi di progetto e organizzazione degli ordini:** riguarda l'implementazione di un approccio improntato al BIM come strategia per la gestione delle fasi di progettazione e della gestione delle commesse. L'adozione di tali sistemi consente di attivare forme di collaborazione nei flussi di lavoro, che possono contare su una matrice informativa unica, costantemente aggiornata, rispetto alla quale scambiare *feedback*, proposte e modifiche. Inoltre, il trasferimento su una piattaforma digitale di tutte le fasi di verifica limita l'insorgere di errori, e contemporaneamente rende immediatamente controllabili le attività di computo dei materiali e gestione degli ordini, stima dei costi e programmazione del cantiere. Questo consente anche di operare considerazioni rispetto all'ottimizzazione del materiale, in quanto le capacità computazionali dei sistemi digitali possono essere sfruttate per calcolare anticipatamente le effettive quantità e le dimensioni esatte dei fogli di cartone da acquistare dai fornitori, diminuendo gli sprechi di materiale. Infine, abbinando la digitalizzazione in BIM a logiche di modellazione parametrica è possibile rendere customizzabile e flessibile la configurazione dell'elemento-base della tecnologia (pannello prefabbricato in cartone), che può essere aggregato in un ambiente virtuale per visualizzarne e verificarne la rispondenza alle esigenze di progetto, anche in processi di co-design con la committenza e gli utenti finali.
- **Adozione di un approccio *file-to-factory*:** implica la possibilità di operare un trasferimento diretto dei dati dalle fasi e strumenti di progettazione a quelli di produzione industrializzata dei componenti. Tale approccio viene abilitato dall'utilizzo di opportuni formati di interscambio delle informazioni tra gli strumenti di modellazione BIM del progetto e i software integrati nei macchinari che gestiscono la fabbricazione dei componenti. I benefici derivanti da questa evoluzione riguardano un maggior controllo sulla qualità del prodotto finito, poiché si riduce drasticamente il rischio di errori derivanti dal calcolo e dall'immissione manuale delle istruzioni di lavorazione nei macchinari. Inoltre, dall'analisi dei processi che hanno implementato questo tipo di approccio si dimostra come questo permetta di ottenere *workflow* agili, riconfigurabili e in grado di auto-riprogrammarsi, in modo che ogni modifica sul prodotto in fase di progetto possa essere direttamente trasferita alle fasi di produzione con minimi costi di personalizzazione, in ottica di customizzazione di massa;
- **Impiego di macchinari ad elevata precisione e automatizzati:** il cambiamento delle strumentazioni e metodologie di fabbricazione è finalizzato all'incremento della precisione sul prodotto finito e alla riduzione della componente di manodopera necessaria nelle operazioni a maggiore rischio (taglio, cordonatura dei fogli). L'automazione

delle sequenze di fabbricazione dei semilavorati permette di demandare agli operatori le sole attività di immissione dei dati di input in macchina e di controllo del corretto funzionamento del macchinario. La combinazione di questa strategia con quelle precedentemente individuate garantisce all'intero processo di ottenere un prodotto finale con elevata qualità tecnologico-costruttiva, strettamente controllate e corrispondenti a quelle verificate in fase di progetto.

L'implementazione di tali indirizzi all'interno delle logiche aziendali permette di attivare una trasformazione verso modelli industrializzati di produzione *smart* (Industria 4.0), efficientando la gestione delle risorse e la qualità dei prodotti finali. Un percorso che trova diretta corrispondenza nel quadro della programmazione strategica comunitaria e nazionale, che riguardano obiettivi di transizione ecologica-circolare e digitale, efficientamento delle filiere costruttive e miglioramento dell'efficacia dei processi edilizi. Acquisito il quadro conoscitivo, le fasi successive della ricerca si sono concentrate sulla effettiva messa in atto delle strategie a partire dal caso-studio del processo di progettazione e produzione dei pannelli prefabbricati in cartone **PACOTEC™ Stre-wall** e contestualmente allo sviluppo di una proposta applicativa di un progetto di unità scolastica emergenziale.

Conclusioni

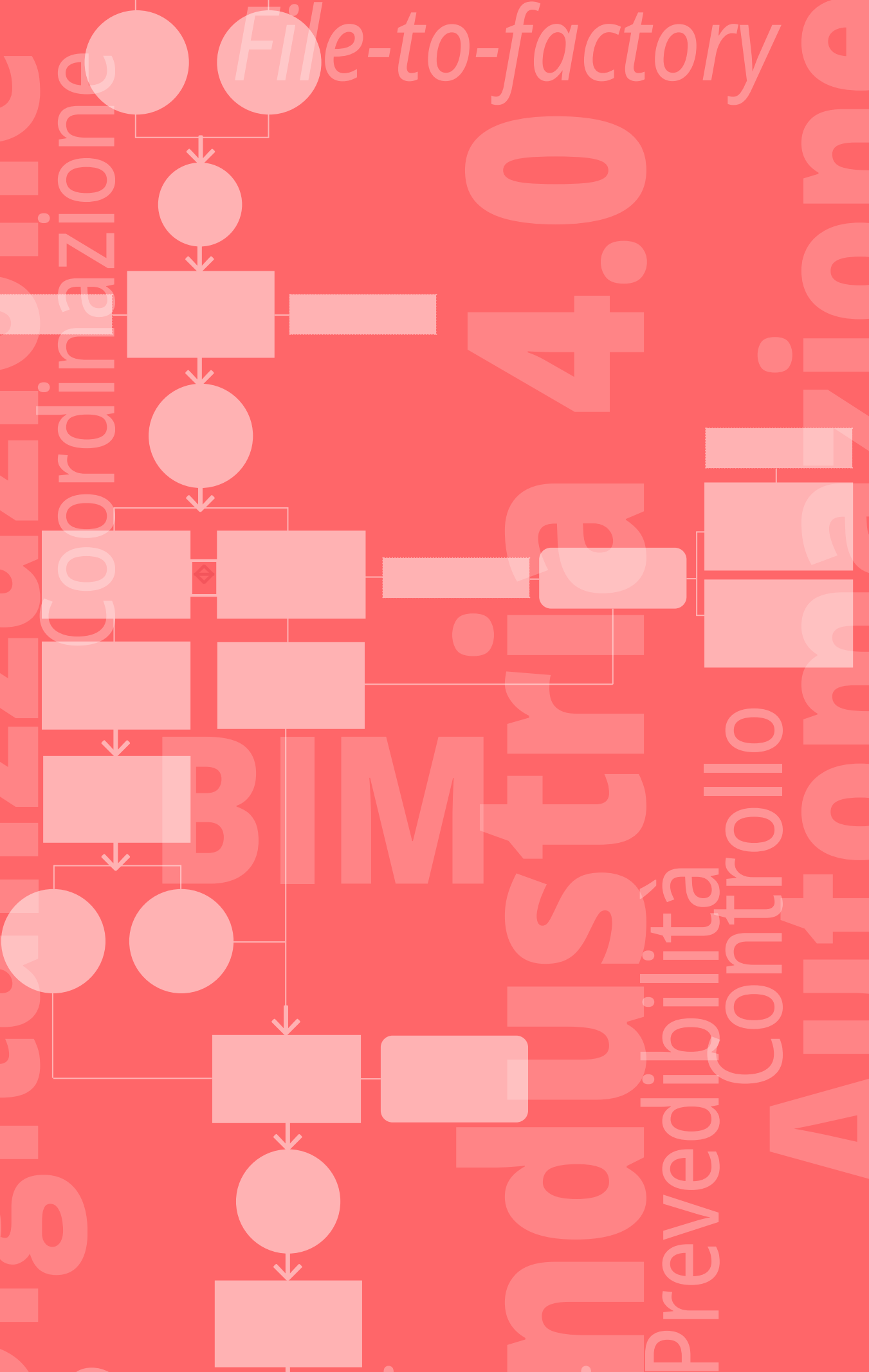
Il settore della prefabbricazione edilizia ha storicamente manifestato una serie di limiti, tecnologici e di approccio, che ne hanno per alcuni decenni precluso l'affermazione come pratica alternativa alla costruzione in opera. Tra le principali cause di insuccesso, la rigidità della produzione, la serialità e standardizzazione degli elementi per rispondere alle urgenze di infrastrutturazione edilizia, in contrasto con le esigenze di adattabilità del progetto di architettura, hanno contribuito a sedimentare nell'immaginario collettivo una diretta associazione tra la prefabbricazione edilizia e una scarsa qualità architettonico-costruttiva. Nello scenario delle innovazioni rese possibili dalla digitalizzazione e automazione della produzione industriale, è però possibile approntare processi di prefabbricazioni improntati ad una nuova qualità e sostenibilità del costruito. L'affermazione di modelli di progettazione e produzione integrati, orientati all'Industria 4.0 e abilitati dalle tecnologie digitali, permettono la trasformazione del processo edilizio in chiave *smart*, prospettando per il settore della prefabbricazione l'attivazione di modelli industriali circolari, altamente tecnologici ed efficienti. Le direzioni di ricerca emergenti sono dunque quelle che guardano ad un ripensamento sistemico del prodotto-processo edilizio attraverso il paradigma della digitalizzazione, che risulta propedeutico a superare gli storici elementi di criticità e rispondere al quadro esigenziale per le costruzioni: adattabilità e customizzazione di massa dei prodotti, controllo qualitativo e prevedibilità, integrazione dei flussi informativi, riduzione dei rifiuti e delle emissioni inquinanti, circolarità delle risorse.

Tali possibilità disvelano il campo di sperimentazione su nuovi sistemi tecnologici, cosiddetti *Modern Methods of Construction*, che fanno proprie le innovazioni della produzione edilizia *off-site* per efficientare i processi realizzativi delle opere. Lo studio rispetto a tali tecnologie costruttive, sviluppato secondo la chiave di lettura della sostenibilità ambientale, è stato portato avanti insieme all'indagine di nuove filiere di prodotto, che attingono a materiali inediti per il settore delle costruzioni, e in particolare esplorando la possibilità di utilizzo del cartone come materiale costruttivo eco-compatibile e circolare. L'analisi ha messo in luce le potenzialità della tecnologia di pannelli prefabbricati in cartone **PACOTEC™ Stre-wall** nella risposta al complesso e articolato quadro esigenziale richiesto per l'intervento emergenziale nell'edilizia scolastica: rapidità di intervento, economicità, dismissibilità e reversibilità degli interventi, qualità costruttiva e di comfort per l'utenza. Il confronto con gli altri MMC disponibili in Europa ha permesso però di osservare come vi siano attualmente dei limiti alla effettiva utilizzabilità della tecnologia nel campo applicativo dell'edilizia scolastica, che compromettono le capacità produttive e l'efficienza del prodotto-processo edilizio. La criticità maggiore risulta però nell'attuale impostazione del processo di progettazione e fabbricazione *off-site* dei componenti del sistema costruttivo; l'artigianalità che contraddistingue la realizzazione dei pannelli prefabbricati contribuisce infatti a determinare una serie di cause di inefficacia del processo: scarsa capacità di personalizzazione del progetto, spreco di materiale, mancanza di controllo e limitati volumi di produzione. Alla luce degli indirizzi di trasformazione dei modelli di produzione edilizia, l'obiettivo di ricerca si è concentrato sull'implementazione dei paradigmi di transizione industriale 4.0 – in primis digitalizzazione e automazione – nel processo di progettazione e produzione della tecnologia di prefabbricazione in cartone. L'intento di più ampio raggio è quello di formulare una proposta progettuale per un modello innovativo, sostenibile e circolare, di unità scolastica emergenziale, sostenuta da un processo realizzativo impostato su principi di efficienza, razionalizzazione e circolarità delle risorse.

Il progetto CARES

File-to-factory

Coordinazione



Customizzazione

Prevedibilità
Controllo

Digitale
Industria 4.0
Automazione

III.1 Digitalizzazione di prodotto-processo per la progettazione e produzione *smart* dei pannelli prefabbricati in cartone

1.1. Premesse, obiettivi di ricerca e metodologia

Dai risultati dell'analisi e della comparazione qualitativa tra la tecnologia di pannelli prefabbricati in cartone **PACOTEC™ Stre-wall** e gli altri MMC è emersa la volontà di avviare una proposta di ricerca che riguardasse l'efficiamento del processo di progettazione e produzione dei pannelli in ottica di Industria 4.0, finalizzata a correggere alcuni fattori di criticità che ostacolano l'applicabilità della tecnologia al campo di applicazione dell'edilizia scolastica di emergenza. Le fasi di sviluppo della proposta di ricerca sono state sviluppate nell'ambito di un accordo di collaborazione con l'azienda AREA S.r.l., titolare del marchio Archicart® che produce la tecnologia di pannelli in cartone. Il dialogo con l'azienda, avviato in concomitanza con la fase analitica della ricerca, è risultato funzionale a mettere puntualmente a fuoco gli elementi di criticità del processo, nonché a definire e verificare progressivamente gli obiettivi specifici. Il confronto è avvenuto in diversi momenti di sviluppo della ricerca, attraverso interviste non strutturate con le diverse competenze e operatori aziendali, analisi di documentazione e progetti, visite agli uffici tecnici, agli impianti di produzione e ai cantieri di installazione dei pannelli. Tali attività sono risultate propedeutiche a individuare un insieme di debolezze dell'attuale processo, che la ricerca ha assunto come riferimento per la definizione, in positivo, degli obiettivi da perseguire. Le inefficienze riscontrate si concentrano in modo particolare nelle fasi di progetto e fabbricazione *off-site* dei componenti, e riguardano:

- Rigidità del processo e limitate opzioni per la customizzazione dei pannelli;
- Scarsa ottimizzazione delle risorse materiali, con conseguenti sprechi e produzione di rifiuti;
- Elevata percentuale di rischio di errori, dovuta al limitato controllo, da parte dei progettisti e delle maestranze, sulle diverse sequenze di progetto, di verifica e valutazione/computo, e di descrizione delle istruzioni per la fabbricazione;
- Insicurezza per i lavoratori, causata dalla prevalenza di operazioni manuali nelle sequenze di taglio, cordonatura dei fogli e successivo assemblaggio dei componenti;

A partire dallo scenario descritto, l'obiettivo verso cui sono state dirette le attività propositive è stato quello di avviare un processo di industrializzazione *smart*, in ottica di Industria 4.0, della progettazione e produzione di pannelli prefabbricati in cartone, con lo scopo – di più ampio raggio – di rendere la tecnologia disponibile per la gestione di condizioni emergenziali nell'ambito dell'edilizia scolastica. La definizione dell'obiettivo trova corrispondenza negli intenti della programmazione aziendale, che intende rivolgere la propria offerta in futuro anche al settore dell'edilizia scolastica, con particolare riferimento agli interventi di carattere transitorio di breve-medio periodo. Inoltre, tra gli interessi dell'azienda vi è anche quello di intraprendere un percorso di transizione del proprio modello produttivo verso sistemi

Fig.1 - Fase propositiva: parole chiave, approcci e strategie di ricerca (Credits: Elaborazione personale)

ad elevata specializzazione tecnologica, integrando i principi dell'Industria 4.0. A questo proposito, contestualmente all'avvio della proposta di ricerca, l'azienda ha sviluppato e acquistato un nuovo macchinario automatizzato per le operazioni di taglio e cordonatura dei fogli, progettandone le componenti *hardware* e *software*. L'acquisto della nuova strumentazione si inserisce nel contesto di una serie di rinnovamenti apportati alle strutture aziendali attraverso le agevolazioni fiscali messe a disposizione dal Piano Transizione 4.0 del MISE, nello specifico il credito d'imposta per l'acquisto di beni strumentali funzionali alla trasformazione tecnologica e digitale dei processi produttivi. Tale operazione, nella visione dell'azienda, è stata intesa come un passaggio propedeutico a sostenere l'efficientamento del processo per aumentare la capacità produttiva e la competitività sul mercato.

Rispetto alle domande di ricerca, gli obiettivi specifici che si è inteso perseguire con la fase propositiva, sono:

- **Ottimizzare le risorse materiali e ridurre la produzione di rifiuti**, ovvero sviluppare un processo di tipo automatizzato che, sulla base delle specifiche caratteristiche dei pannelli che è necessario produrre per ogni progetto, fornisca l'informazione sulle esatte quantità e dimensioni dei sotto-prodotti (fogli di cartone) da acquistare dai fornitori, in modo da ridurre lo spreco di materiale;
- **Favorire un maggior controllo sulla qualità del prodotto e rendere il processo prevedibile**, attraverso l'implementazione di un processo digitalizzato *file-to-factory* che interconnetta le informazioni dalla fase di progetto a quella di fabbricazione industriale dei pannelli. Contemporaneamente, l'obiettivo che si intende perseguire è quello di mettere a punto uno strumento per la gestione degli ordini e del magazzino, che ne segua le diverse fasi di sviluppo dalle commesse dal progetto (verifiche dimensionali e di conformità normativa, computo di materiali e costi), l'approvvigionamento dei materiali, la fabbricazione e stoccaggio dei componenti;
- **Rendere il processo flessibile** per assecondare le necessità di adattamento e personalizzazione dei pannelli **in ottica di customizzazione di massa**, implementando un nuovo flusso di lavoro in grado di auto-riconfigurarsi senza richiedere l'aggiornamento manuale o la riprogettazione da parte degli operatori. Si intende dunque definire e formalizzare un modello organizzativo del processo che permetta di produrre pannelli prefabbricati customizzati a fronte di costi allineati a quelli della produzione standardizzata;
- **Aumentare la coordinazione** tra le diverse competenze, attori e informazioni coinvolti nel processo, dalle fasi di progettazione a quelle di fabbricazione dei componenti, attraverso il trasferimento delle sequenze organizzative in una piattaforma digitale che rappresenti una base comune per facilitare lo scambio di dati e informazioni, sia internamente tra le diverse aree di progetto, sviluppo, organizzazione e produzione, sia con consulenti, fornitori e progettisti esterni;
- **Incrementare la sicurezza per i lavoratori** durante le fasi di produzione dei pannelli, favorendo l'automazione di processo per ridurre la componente di interazione tra gli operatori e i macchinari di produzione.
- **Testare il nuovo modello organizzativo** nello sviluppo di una proposta progettuale per un modello innovativo e sostenibile di unità scolastica emergenziale;

Per perseguire tali obiettivi, la proposta di ricerca è stata sviluppata secondo una metodologia strutturata in fasi di successivo approfondimento; una parte delle attività di ricerca è stata svolta nell'ambito di una *short-term mission* presso la sede dell'azienda a Giarre (Catania), presso la quale è stato previsto un periodo di permanenza di circa due mesi per l'implementazione sul campo della proposta di ricerca. La possibilità di mettere progressivamente in pratica le ipotesi sui nuovi strumenti e metodi di lavoro, testandoli nell'immediato e ricevendone *feedback* diretti da parte degli operatori aziendali è risultato un elemento essenziale a verificare l'utilità e la fattibilità delle soluzioni

proposte a livello teorico, affinandole in considerazione dei risultati osservati. Con queste premesse, le fasi propositive si sono articolate nelle seguenti attività (Fig.2), approfondite nei capitoli successivi:

→ **Fase 01** **Analisi e formalizzazione del workflow attuale** adottato per la progettazione e produzione dei pannelli prefabbricati in cartone, necessaria ad individuare le aree del processo e gli strumenti su cui intervenire per l'efficiamento del processo;

→ **Fase 02** **Riprogettazione del processo secondo i principi dell'Industria 4.0**, rintracciati nella fase di analisi della letteratura scientifica di riferimento, in particolare attraverso i paradigmi della digitalizzazione e automazione, arrivando a definire un nuovo flusso di lavoro da seguire nelle fasi di progetto e produzione dei pannelli;

→ **Fase 03** **Implementazione del nuovo processo in azienda**, finalizzato a testare le soluzioni proposte nella Fase (02). Tale fase è stata sviluppata nell'ambito di una *short-term mission* svolta in azienda; ha previsto una prima fase di digitalizzazione in BIM di una serie di componenti-base della tecnologia costruttiva, e una seconda di sviluppo di uno strumento digitalizzato (ambiente di configurazione) che consente di aggregare e gestire le fasi di progetto, approvvigionamento dei materiali e produzione dei componenti prefabbricati;

→ **Fase 04** **Test e verifica del modello di processo**, promossa nell'ambito dello sviluppo della proposta progettuale del modello di unità scolastica emergenziale **CARES**, che ha rappresentato il contesto applicativo rispetto a cui testare gli strumenti e approcci introdotti con il nuovo modello di processo. La verifica è stata promossa attraverso il calcolo dell'ottimizzazione del materiale resa possibile dal nuovo processo, e infine sono stati acquisiti una serie di *feedback* da parte degli operatori aziendali che hanno utilizzato i nuovi strumenti nello sviluppo del progetto.

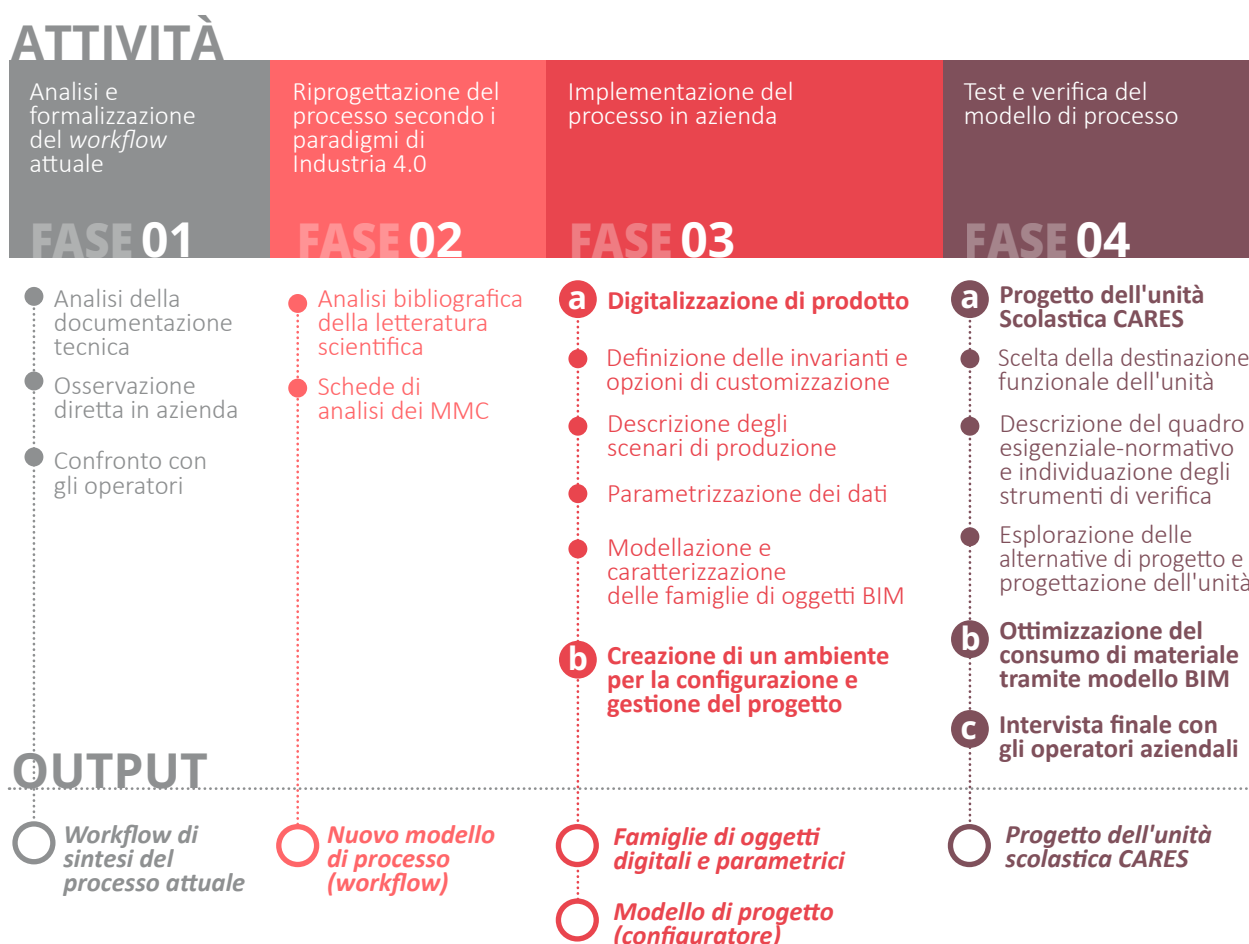


Fig.2 - Metodologia e fasi di sviluppo della proposta di ricerca (Credits: Elaborazione personale)

1.2. Analisi e formalizzazione dell'attuale processo di progettazione e produzione dei pannelli prefabbricati in cartone

La fase propedeutica all'elaborazione della proposta di ricerca è consistita nell'analisi e nella descrizione dell'attuale impostazione del processo adottata dall'azienda (Fase 01, Fig.3). Tale studio è stato condotto attraverso l'analisi della documentazione tecnica messa a disposizione dall'azienda, tra cui:

- Documenti inerenti alla precedente realizzazione di progetti che hanno previsto l'impiego della tecnologia **PACOTEC™ Stre-wall**, in particolare i due prototipi realizzati dall'azienda presso l'Università di Catania nel 2018 (T-Box) e nel dicembre 2020 all'interno del campus dell'Università di Corsica Pasquale Paoli (Corte, FR) (Cfr. **Pt. II, Cap. 4.4**);
- Relazioni tecniche che sintetizzano e graficizzano le operazioni di lavorazione dei fogli di cartone, illustrando le sequenze di movimentazione e inserimento dei fogli in macchina.

Lo studio è stato poi completato attraverso l'osservazione diretta del processo e il confronto con gli operatori, finalizzato a individuare eventuali elementi di debolezza e/o insoddisfazione rilevati dagli addetti rispetto all'impostazione attuale del lavoro. Acquisite le informazioni necessarie, queste sono state descritte e sintetizzate in un diagramma di flusso che mette in relazione le diverse fasi, strumenti e attori coinvolti nel processo, nelle fasi di progetto, approvvigionamento dei materiali, gestione degli ordini e della produzione, e fabbricazione dei pannelli.

Il *workflow* che riassume questa prima fase di indagine è rappresentato nella Fig.4. Con tale passaggio, di natura conoscitiva, è stato possibile chiarire e mettere a fuoco puntualmente gli elementi critici del processo da correggere, ovvero:

- **Orizzontalità dell'intero processo:** risulta dal fatto che ogni operatore coinvolto nelle fasi di progetto, verifica, computo e produzione dei pannelli, utilizza strumenti diversi per la gestione delle informazioni, che non sono in grado di comunicare direttamente tra di loro. Ciò risulta in un flusso informativo estremamente parcellizzato, che prolunga i tempi di sviluppo del processo edilizio e in cui è elevato il rischio di perdita di dati e/o di errori nella comunicazione tra gli attori e nella trasmissione dei dati;
- **Impostazione progettuale basata sull'uso di software CAD,** che richiede l'aggiornamento manuale dei disegni e della documentazione tecnica per ogni diversa configurazione dei pannelli richiesta dai committenti. Questo aspetto, oltre ad aumentare il tempo richiesto per l'elaborazione del progetto alle varie fasi, richiama inoltre una serie di vulnerabilità del sistema rispetto all'incorrere di errori in fase di progetto esecutivo, con l'ulteriore rischio di dover interrompere la produzione per correggere le incongruenze e/o rifabbricare gli elementi. Inoltre, proprio in questo

Analisi e formalizzazione del *workflow* attuale

FASE 01

- Analisi della documentazione tecnica
- Osservazione diretta in azienda
- Confronto con gli operatori

Workflow di sintesi del processo attuale

Fig.3 - Fase 01- Analisi e formalizzazione dell'attuale processo di progettazione e produzione dei pannelli prefabbricati in cartone (Credits: Elaborazione personale)

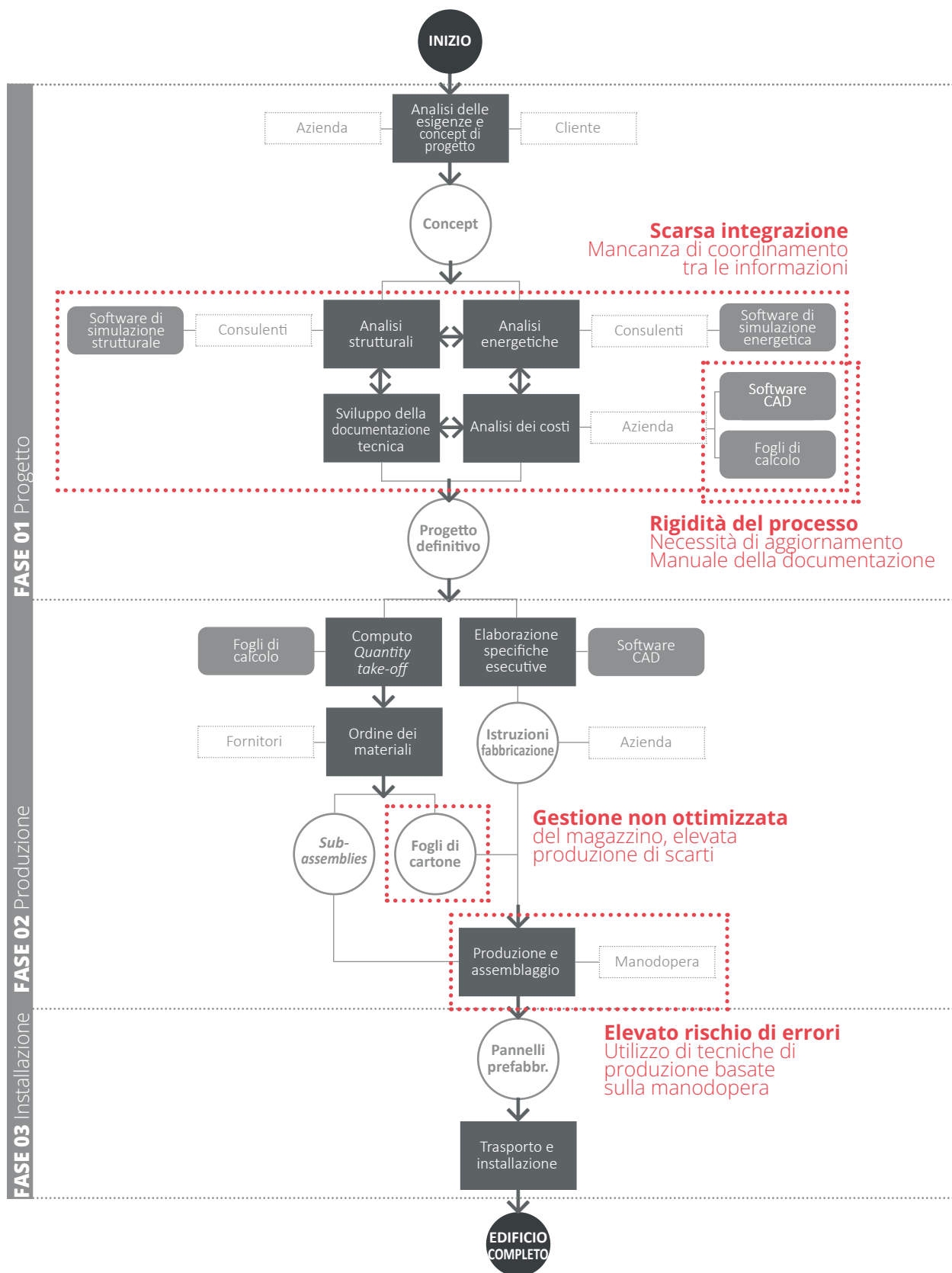


Fig.4 - Diagramma di flusso che sintetizza l'attuale processo di progettazione e produzione dei pannelli prefabbricati (Credits: Elaborazione personale)

tipo di impostazione si individua il maggiore limite alla flessibilità e adattabilità del sistema in ottica di customizzazione di massa, poiché la riprogrammazione del processo – necessaria per aggiornare i documenti e riformulare le specifiche di lavorazione per ciascun pannello –, comporta un aumento dei costi di sviluppo di soluzioni personalizzate, rendendo economicamente preferibili soluzioni di tipo standardizzato e prodotte in serie;

- **Mancanza di controllo delle fasi di produzione**, che consiste in una difficoltà nella gestione degli ordini, soprattutto se molteplici, durante la fabbricazione dei pezzi. Tale limite è dovuto all'assenza di una metodologia standardizzata e sistematica nella catalogazione degli elementi costruttivi in fase di progetto, che inevitabilmente si ripercuote sulle sequenze di lavorazione dei fogli e sul loro assemblaggio. A livello operativo, in fase di elaborazione dei disegni esecutivi, manca una classificazione univoca dei pezzi che è necessario produrre per ciascun pannello, ovvero la distinta di tutti i pezzi secondo uno schema a "kit di montaggio". Dal momento in cui viene avviata la lavorazione, il tracciamento dello stato di avanzamento dell'ordine è affidato alle maestranze, che controllano e gestiscono lo stoccaggio dei semilavorati e la loro aggregazione nel pannello finale;
- **Gestione non ottimizzata del magazzino**, dal momento che il controllo rispetto alla quantità di materiale utilizzato è effettuato visivamente dagli operatori; il materiale viene quindi rifornito senza avere oggettiva conoscenza dei quantitativi consumati e di quelli che saranno necessari per soddisfare gli ordini successivi, con il rischio di accumulare o, al contrario, avere una mancanza di materiale disponibile. A causa di questa non-corrispondenza tra ordini e approvvigionamento di materiale, i fogli di cartone vengono attualmente acquistati in dimensioni standardizzate, non ottimizzate rispetto a quelle effettivamente necessarie alla produzione dei singoli pannelli, aumentando la percentuale di scarti e rifiuti generati dal processo;
- **Utilizzo di macchinari che richiedono elevata interazione manuale** e in cui il controllo della qualità del prodotto finale è affidata alle capacità degli operatori di produzione. Inoltre, nonostante le opportune misure di sicurezza adottate in azienda, la tipologia di attrezzature impiegate per la lavorazione presuppone implicitamente anche una maggiore esposizione al rischio di incidenti e/o infortuni da parte della manodopera (Fig.5).

Definito questo insieme di criticità rispetto al flusso di lavoro attuale, sono state identificate una serie di aree strategiche in cui andare ad intervenire, riprogettando il processo attraverso l'integrazione di una serie di nuovi approcci e strumenti digitalizzati in grado di efficientare il lavoro, traguardando gli obiettivi di ricerca stabiliti. Il grafico prodotto in output da questa prima fase (Fig.4) ha fornito la base su cui integrare le strategie proposte, consentendo di verificare la compatibilità delle nuove azioni con quelle esistenti che verranno mantenute.

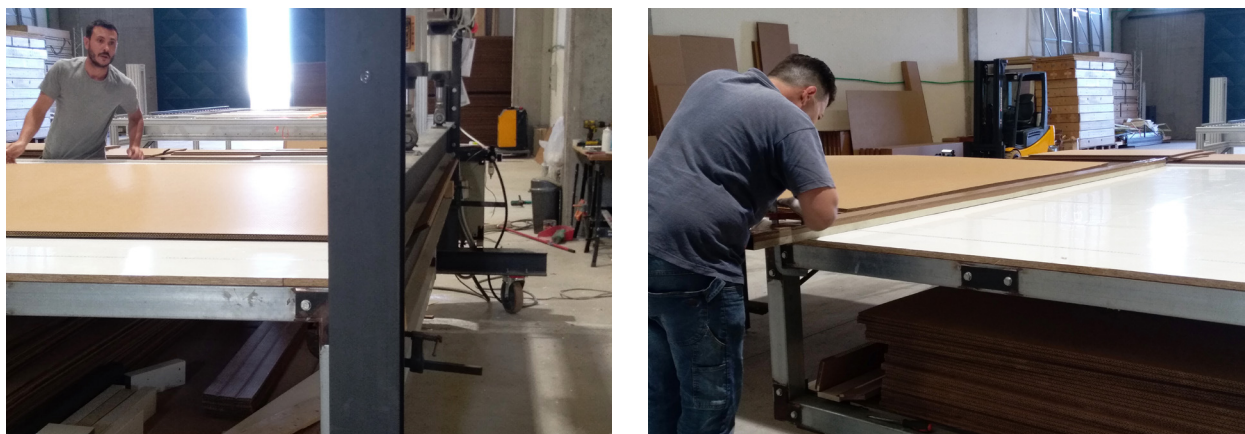


Fig.5 - La produzione *off-site* dei pannelli prevede sequenze di lavorazione prevalentemente basate sulla manodopera (Credits: Foto personale, 2021)

1.3. Riprogettazione del processo secondo i paradigmi dell'Industria 4.0



Fig.6 - Fase 02- Riprogettazione del processo secondo i paradigmi dell'Industria 4.0 (Credits: Elaborazione personale)

La Fase 02 ha previsto la messa a punto di un nuovo *workflow* del processo di progetto e produzione dei pannelli, formalizzato in un diagramma in cui vengono individuate le nuove fasi e strumenti da implementare e/o acquisire (Fig.6). Tale fase è stata sviluppata a partire dai paradigmi di innovazioni emersi dal quadro conoscitivo iniziale rispetto ai modelli industriali di tipo *smart* (Industria 4.0), ovvero andando a rintracciare e selezionare, tra quelli individuati dalla letteratura scientifica, gli approcci, strategie e tecnologie digitali che ritenute maggiormente coerenti ed efficaci a perseguire gli obiettivi della ricerca. Nello specifico, i paradigmi che hanno fatto da riferimento per la riprogettazione del processo sono quelli della digitalizzazione di prodotto dell'automazione di processo, abilitati rispettivamente dall'uso di strumenti BIM e macchinari di produzione ad elevata precisione interconnessi in rete (IoT). Nel primo caso, l'uso di strumenti BIM è stato scelto perché permette di integrare il processo, offrendo uno strumento di lavoro che può essere utilizzato progressivamente dai diversi operatori per estrapolare o integrare le informazioni necessarie a ciascun operatore, riferite ad una modellazione digitalizzata comune dell'edificio. Inoltre, le piattaforme BIM consentono di "aprire" il processo alla successiva integrazione con altri aspetti di valutazione e gestione del progetto (simulazioni strutturali, energetiche¹, cantierizzazione *BIM-to-field*, manutenzione e gestione dell'edificio).

La digitalizzazione dei componenti in ambiente BIM è stata quindi interpretata come il primo passaggio di strutturazione di una base comune interoperabile, in cui far confluire i diversi flussi informativi inerenti alla gestione globale del ciclo di vita dell'edificio. La nuova organizzazione del processo secondo una struttura integrata contribuisce inoltre a velocizzare le attività di progetto e verifica, preparazione della documentazione tecnica e delle specifiche di esecuzione delle lavorazioni. Da un punto di vista organizzativo della produzione, l'adozione di strumenti BIM per la digitalizzazione del processo è in grado di sistematizzare e organizzare una metodologia ripetibile e scalabile, che permette di superare le attuali difficoltà legate al controllo degli ordini e alla mancanza di un metodo di codifica degli elementi del sistema costruttivo. Questo perché è implicita degli strumenti di modellazione BIM la possibilità di rappresentare gli edifici discretizzandoli nei loro sistemi e componenti, che a loro volta possono essere ulteriormente categorizzati in elementi costruttivi e materiali. Ciò permette, a valle della modellazione digitale, di poter estrapolare un "kit di montaggio" virtuale, ovvero la distinta esatta di tutti i pezzi necessari. In ottica di produzione, la catalogazione dei pezzi fornisce una *check-list* rispetto alla quale organizzare, aggregare e stoccare i semi-lavorati e i componenti lungo l'intera catena di montaggio.

Per quanto attiene alla strumentazione, la sostituzione dei macchinari esistenti con si-

1. Si parla in questo caso di Building Energy Modelling (BEM).

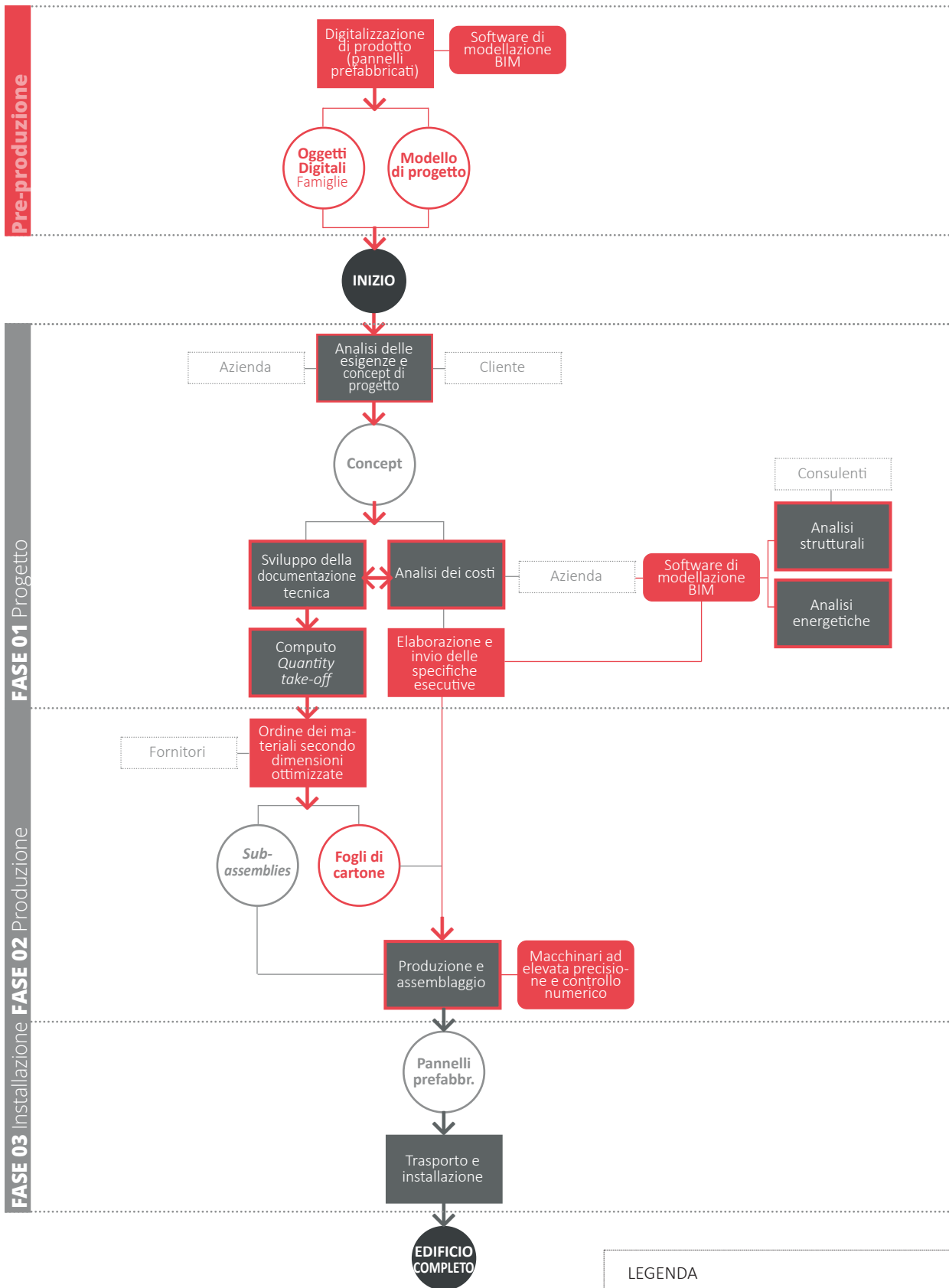


Fig.7 - Diagramma di flusso che sintetizza il nuovo processo sviluppato per la progettazione e produzione dei pannelli prefabbricati (Credits: Elaborazione personale)

stemi ad elevata precisione e a controllo numerico, prevista e finanziata dall'azienda, supporta l'incremento della qualità del prodotto finale abilitando il trasferimento diretto delle informazioni dal modello digitalizzato in BIM al software di controllo dei macchinari di lavorazione, avviando la produzione in maniera automatizzata da remoto. Contemporaneamente, la comunicazione diretta tra i diversi strumenti rende flessibile e adattabile il flusso di lavoro rispetto alla necessità di customizzazione dei prodotti, dal momento che la personalizzazione dei pezzi avviene senza riconfigurare la catena di produzione. In questa prospettiva, il nuovo *workflow* (Fig.7) opera una ricucitura tra il valore della produzione artigianale e la qualità ed efficienza dei sistemi di produzione altamente industrializzati.

La comunicazione tra strumenti, in aderenza ai principi caratterizzanti di una *smart factory*, è resa possibile anche nella direzione opposta, ovvero dai macchinari di produzione a quelli di progettazione e gestione del processo. Il software che controlla il macchinario di taglio e cordonatura è infatti capace di acquisire e registrare una serie di informazioni circa lo stato della lavorazione, per esempio il quantitativo di cartone utilizzato. Ricevendo tale informazione, l'area logistica può programmare la fornitura del materiale, ottimizzando i tempi e lo spazio necessario allo stoccaggio in azienda. Al tempo stesso, i dati reali rilevati dal macchinario servono come parametro di confronto rispetto ai quantitativi che vengono calcolati in fase di progetto, e permettono di capire se e dove vi sono errori sul calcolo delle quantità da parte del modello digitale. Dalla comparazione – effettuata per un tempo sufficientemente prolungato – tra la quantità di cartone prevista per una specifica produzione e quella effettivamente utilizzata, è possibile anche andare ad indagare se vi siano difetti ricorrenti nelle partite ricevute da un determinato fornitore, in modo da poter intervenire per evitare sprechi eccessivi di fogli non idonei alla produzione.

In ultimo, l'automazione di processo consente implicitamente anche di rispondere alle questioni legate alla sicurezza dei lavoratori durante le fasi di produzione, limitando – attraverso l'uso di strumenti digitalizzati – la necessità di interazione diretta tra gli operatori e i macchinari.

Individuate a livello macroscopico tali strategie e approcci di intervento, le azioni puntuali che sono state previste per la successiva implementazione sono (Fig.7):

→ Fase 03.a Digitalizzazione di prodotto, ovvero modellazione parametrica in ambiente BIM dei componenti del sistema costruttivo (pannelli prefabbricati). Tale passaggio avviene in modo che dal modello digitale sia possibile estrapolare non solo le informazioni relative alle caratteristiche geometrico-dimensionali dei pannelli, ma anche i dati necessari ad avviare le lavorazioni di taglio e cordonatura dei fogli di cartone (coordinate di lavorazione). In ottica di integrazione del processo, il modello digitalizzato risulta utilizzabile anche per lo sviluppo delle simulazioni di tipo strutturale, energetico-ambientale, ecc., configurandosi come il nucleo informativo di base, su cui operare il processo iterativo di progetto-verifica delle soluzioni architettonico-costruttive, da mettere a disposizione dei diversi attori e consulenti interni ed esterni;

→ Fase 03.b Creazione di un ambiente di configurazione del progetto in cui sia possibile aggregare i modelli digitalizzati dei pannelli in cartone. All'interno del modello verranno predisposte una serie di schede/abachi in grado di raccogliere e sistematizzare le informazioni relative a:

- Distinta dei pannelli necessari per lo specifico progetto, codificati in maniera univoca e tracciabile secondo la tipologia e la loro posizione nell'edificio;
- Distinta dei materiali: informazioni circa le quantità dei diversi materiali, tra cui il volume di isolante sfuso da insufflare, le sezioni e lunghezze degli elementi in legno, la superficie delle finiture esterne ed interne, la quantità e tipo di ancoraggi;

- Distinta del cartone: dimensioni esatte dei pezzi in cartone rispetto alle tipologie di pannelli, *console* per l’ottimizzazione delle dimensioni e quantità dei fogli di cartone da acquistare dai fornitori, calcolate aggregando più pezzi in un singolo foglio;
- Computo estimativo dei materiali;
- Elenco ordinato dei parametri (coordinate) di lavorazione dei fogli di cartone.

1.4. Implementazione del processo in azienda

La fase successiva (Fase 03) ha riguardato l’effettiva messa in pratica degli indirizzi stabiliti dal nuovo modello organizzativo; la fase di implementazione ha riguardato le sole strategie e aree individuate in Fig.7, ovvero la digitalizzazione dei pannelli prefabbricati, la riorganizzazione delle sequenze di progettazione e produzione e la connessione dei dati tra il modello elaborato in BIM e il nuovo macchinario di taglio-cordonatura. Non sono state invece oggetto di implementazione le strategie relative all’integrazione tra il modello BIM e gli strumenti di simulazione (*plug-in* e/o software). Rispetto a questi ultimi è stata prevista, in concomitanza con le fasi di sviluppo del progetto dell’unità scolastica **CARES**, la ricognizione e selezione degli strumenti ritenuti più idonei a garantire l’interoperabilità con il modello BIM, allo scopo di prefigurare implementabilità del *workflow* nella sua interezza nelle successive fasi di sviluppo della ricerca (Cfr. **Pt. III, Cap.3**).

L’implementazione del nuovo modello di processo in azienda, a sua volta ha previsto una serie di step e sotto-fasi intermedie secondo una consequenzialità a cascata (Fig.8). Nello specifico, le attività intermedie sono state sviluppate secondo le seguenti fasi:

→ Fase 03.a Digitalizzazione di prodotto

È consistita nella modellazione parametrica dei pannelli in cartone attraverso il software Autodesk® Revit, finalizzata alla creazione di una serie di oggetti digitali parametrici, modificabili nelle configurazioni progettuali a partire da una serie di dati di input immessi dall’utente. Al fine di promuovere l’approccio *file-to-factory* e di controllare dal software le diverse fasi di progetto-produzione,

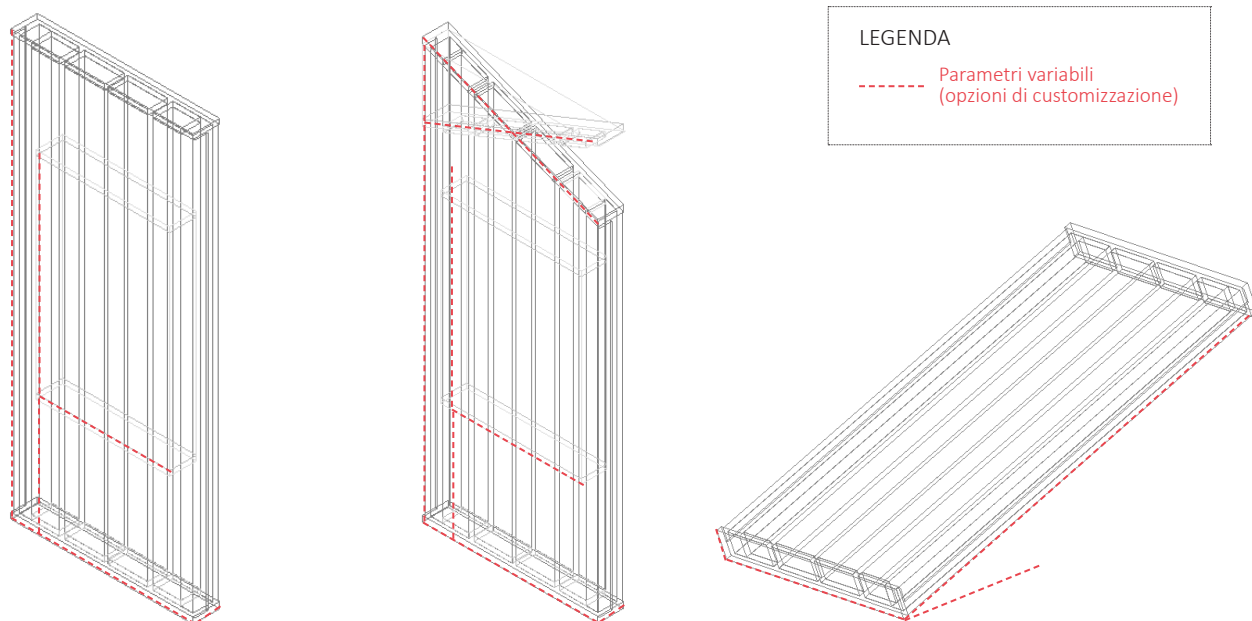


Fig.8 - Fase 03- Implementazione del processo in azienda: fasi e attività di sviluppo (Credits: Elaborazione personale)

sono state inserite tre macro-categorie di informazioni all'interno del modello digitale: (1) i dati che regolano le caratteristiche geometrico-dimensionali dei pannelli, (2) le informazioni di costo e (3) le coordinate di lavorazione necessarie ad eseguire le operazioni di taglio e cordonatura dei fogli. Allo scopo di caratterizzare le informazioni da inserire all'interno dei modelli, sono state sviluppate le seguenti fasi di progettazione della struttura dati:

- **Definizione delle invarianti e delle opzioni di customizzazione del sistema tecnologico.** Sono state definite le possibilità di personalizzazione dei pannelli, individuando le tipologie di pannelli realizzabili e discretizzando gli elementi del sistema costruttivo in dati fissi e variabili, settando i limiti dimensionali imposti dalle esigenze e dai vincoli di produzione (Fig.9). Tale fase è stata sviluppata a partire dagli input forniti dall'azienda, a cui è stato chiesto di definire gli elementi (dimensioni, materiali) che possono essere personalizzati nel pannello; in negativo, sono state identificate quelle caratteristiche che, coerentemente con i limiti tecnico-organizzativi di produzione, devono mantenersi invariate e/o che devono sottostare a determinati vincoli pre-impostati. Per esempio, l'altezza massima del pannello è stata impostata a 3080 mm, dettata dalla dimensione massima del foglio prodotto dai fornitori², soglia oltre la quale è necessario scomporre il pannello in due parti separate da un giunto. Analogamente, il numero dei tubolari interni a ciascun pannello è stato fissato a quattro, poiché il pannello così composto risulta pre-verificato e validato nelle prestazioni di resistenza meccanica. I parametri per i quali non sono previste opzioni di customizzazione sono quelli indicati come "Fissi" nella Tabella 01, colonna "Tipo".
- **Descrizione degli scenari di produzione.** Tale fase è risultata propedeutica ad individuare il tipo e il contenuto delle informazioni da immettere in input per le operazioni di taglio e cordonatura dei fogli di cartone (3), e ha previsto la descrizione grafica delle possibili casistiche di lavorazione (Fig.10). Tale operazione ha permesso di assegnare una nomenclatura univoca ai dati che devono essere descritti per l'esecuzione delle sequenze di fabbricazione, e in seguito di scrivere la formula che calcola il valore delle coordinate che regolano la posizione degli utensili di taglio e cordonatura. Vista la stretta relazione tra i dati di lavorazione e la logica utilizzata nella programmazione del nuovo macchinario, questa fase è stata sviluppata contestualmente alla progettazione dell'architettura dell'algoritmo che ne controlla la parte software (Fig.11). Attraverso gli scenari di produzione, per ciascuna tipologia di pannello sono stati individuati i parametri che era necessario descrivere per regolare la lavorazione dei fogli, ognuno dei quali è stato nominato univocamente da un codice che tiene progressivamente conto:
 - Del tipo di foglio in lavorazione (foglio esterno o tubolare);
 - Del tipo di pannello in cui viene inserito;
 - Del tipo di lavorazione (taglio o cordonatura).

2. A sua volta, tale dimensione risulta dalla massima capacità dei macchinari di ondulazione usati dalle cartiere, che non consentono di ottenere fogli con ampiezza maggiore a 3100 mm nella direzione perpendicolare ai rulli di ondulazione.



Pannello verticale		Pannello verticale sagomato		Pannello orizzontale	
<i>Invarianti</i>	<i>Customizzazione</i>	<i>Invarianti</i>	<i>Customizzazione</i>	<i>Invarianti</i>	<i>Customizzazione</i>
Struttura Quattro tubolari per pannello	Dimensioni pannello Altezza Larghezza Spessore	Struttura Quattro tubolari per pannello	Dimensioni pannello Altezza dx/sn Larghezza Spessore	Struttura Quattro tubolari per pannello	Dimensioni pannello Lunghezza Larghezza Spessore
Materiale Cartone tripla onda, sp.1.4cm	Infisso Scelta inserimento	Materiale Cartone tripla onda, sp.1.4cm	Posizione Inclinazione destra/sinistra	Materiale Cartone tripla onda, sp.1.4cm	Inclinazione Angolo della falda
	Dimensioni infisso Altezza davanzale Larghezza Altezza		Inclinazione Angolo della falda		Isolante Scelta materiale
	Isolante Scelta materiale		Infisso Scelta inserimento		
			Dimensioni infisso Altezza davanzale Larghezza Altezza		
			Isolante Scelta materiale		

Fig.9 - Individuazione delle invarianti e delle opzioni di customizzazione delle diverse tipologie di pannelli prefabbricati in cartone (Credits: Elaborazione personale)

Nel codice di ciascun parametro, l'indicazione circa il tipo di pannello a cui il foglio fa riferimento deriva dalla necessità di tenere traccia della specifica lavorazione avviata, in modo da essere in grado di risalire all'operazione a monte in caso di errori, e successivamente di attribuire ad ogni pezzo realizzato la corrispondenza con il pannello in cui deve essere aggregato.

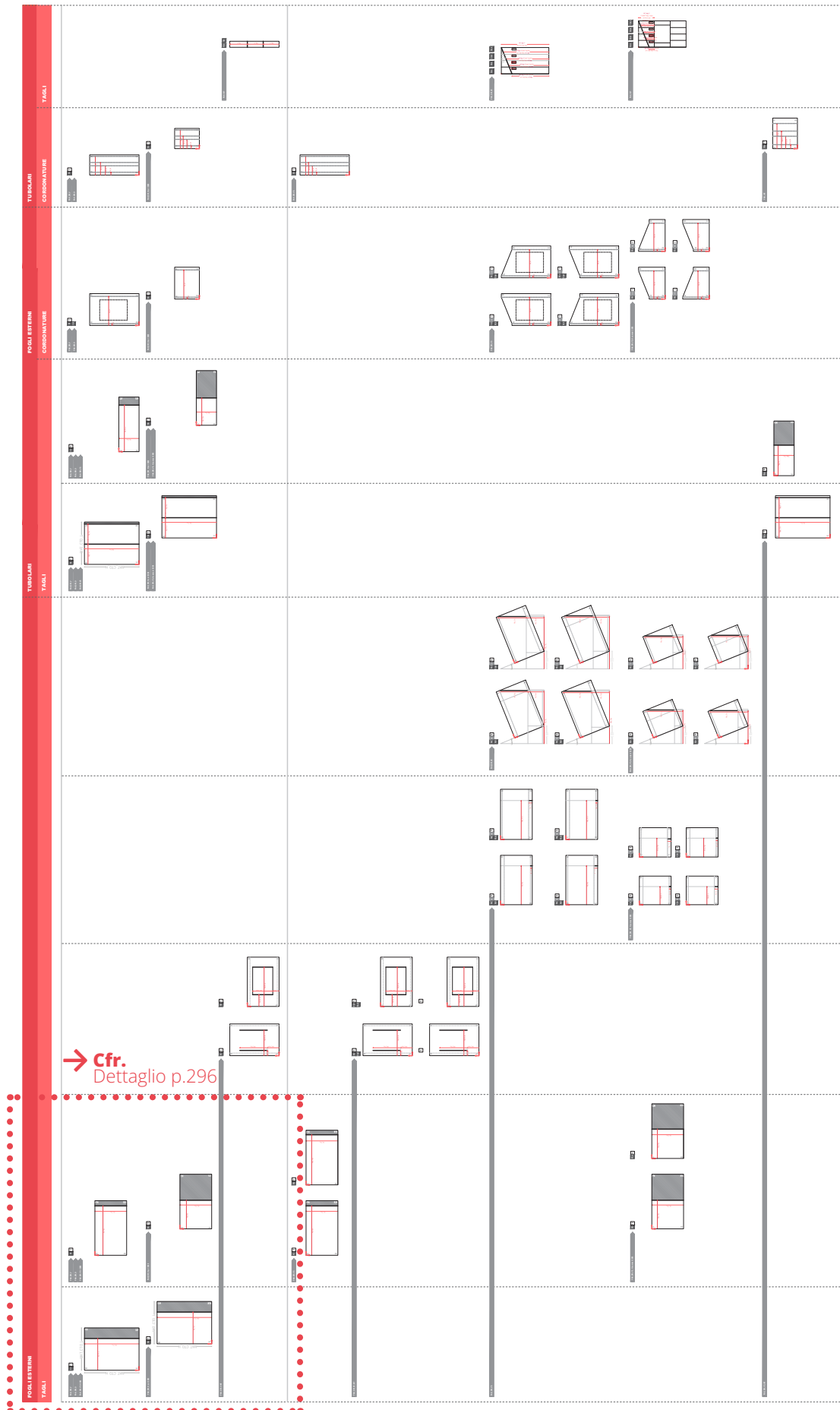


Fig.10 - Scenari di produzione: classificazione e caratterizzazione dei dati propedeutici alla lavorazione dei fogli di cartone (Credits: Elaborazione personale)

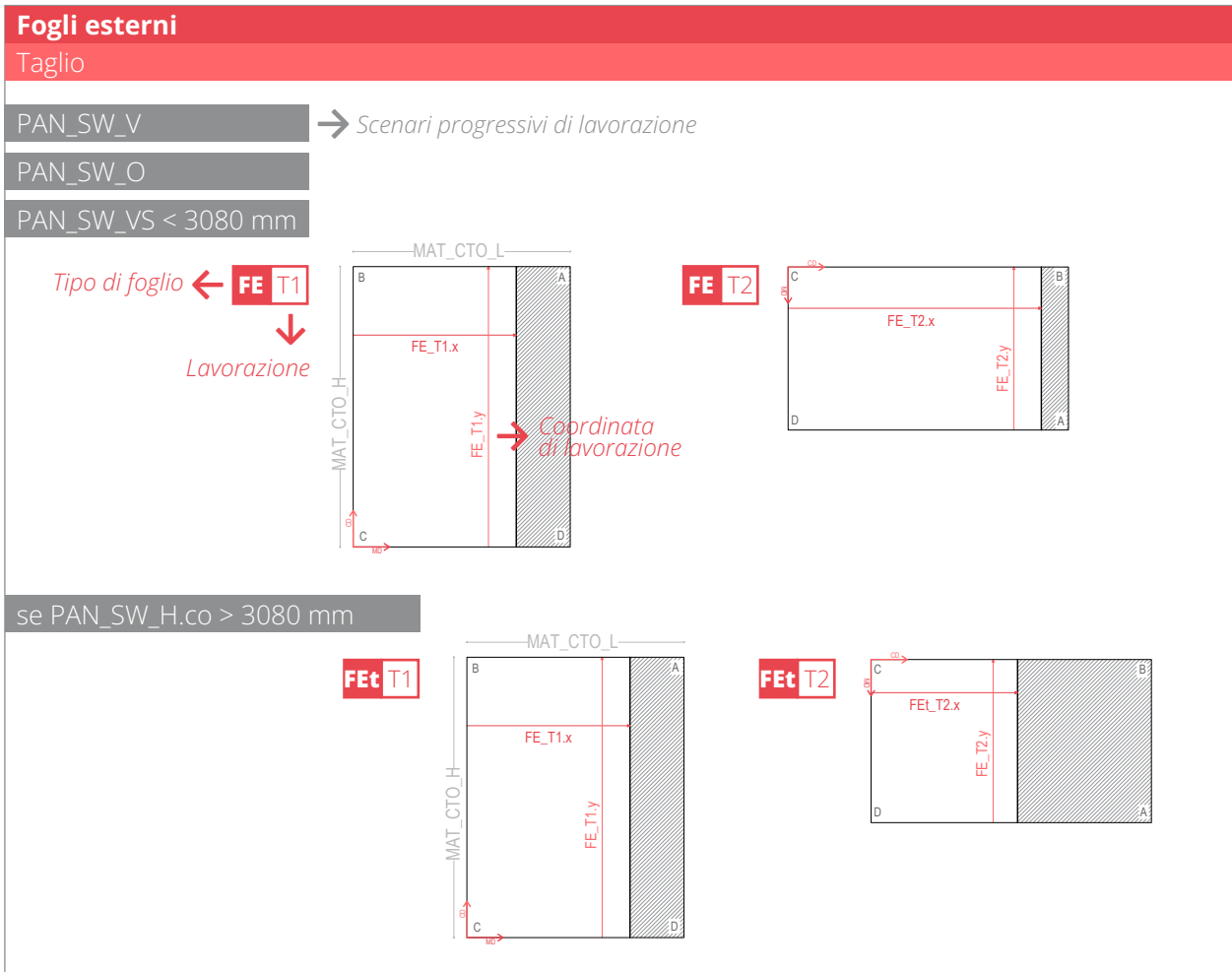


Fig.10 - Scenari di produzione: classificazione e caratterizzazione dei dati propedeutici alla lavorazione dei fogli di cartone (Credits: Elaborazione personale)

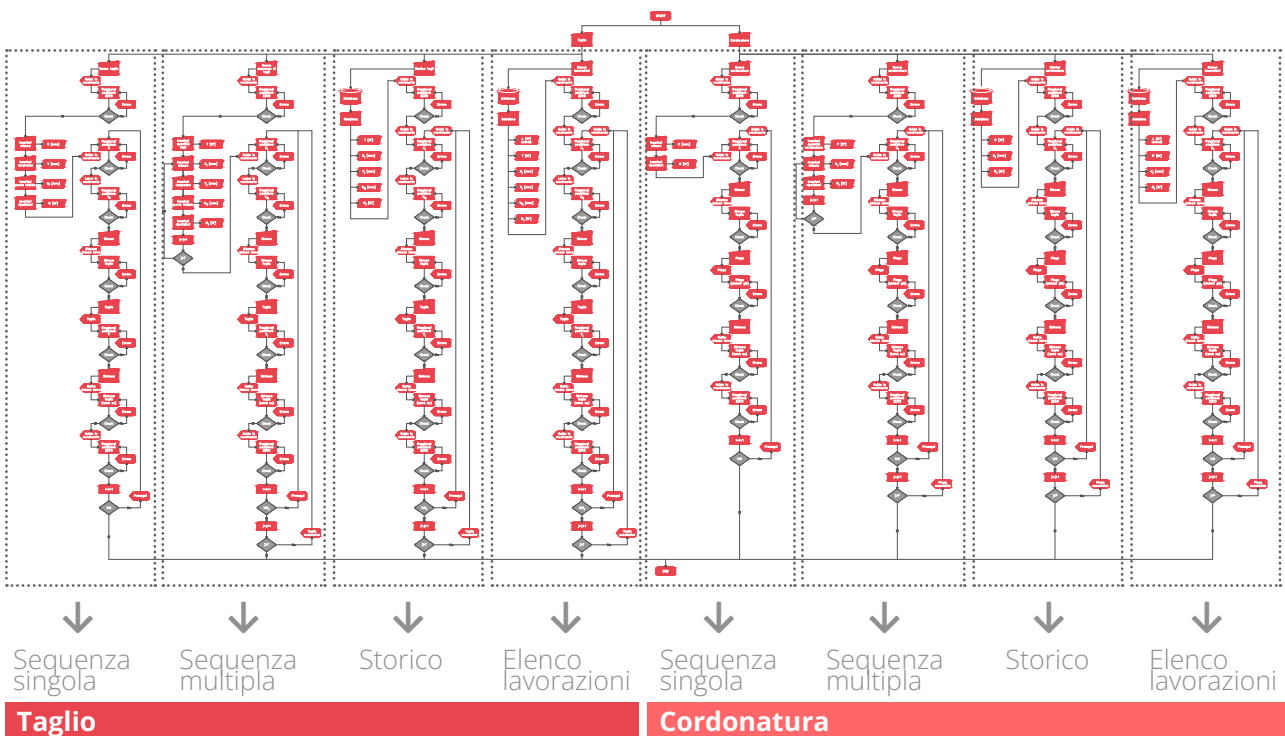


Fig.11 - Algoritmo per la programmazione del software che controlla il macchinario di taglio e cordonatura dei fogli di cartone (Credits: © D.L.Distefano, Archicart®, 2021)

- **Parametrizzazione dei dati.** Le variabili definite sono state messe a sistema, parametrizzate e relazionate descrivendo in un foglio di calcolo una formula o istruzione condizionale che, a partire da specifici valori immessi in input, restituiscono in output uno specifico valore che viene attribuito al modello digitale. La parametrizzazione dei dati ha seguito la struttura impostata nella Fig.13 (p.307), ed è stata dapprima sviluppata esternamente al software BIM per rapidità e semplicità di scrittura delle formule, per agevolare le operazioni di correzione, modifiche e integrazioni, oltre che per disporre di uno strumento di guida per eventuali utilizzatori esterni. L'architettura e la nomenclatura dei dati (parametri) contenuti nei modelli digitali è sintetizzata nelle Tabelle 01-04, rispettivamente per i pannelli prefabbricati, i profili di completamento in legno, gli ancoraggi e i materiali; le tabelle classificano i parametri inseriti nella modellazione, descrivendo per ciascuno le formule di calcolo che li relazionano con gli altri. Nel caso dei dati morfologico-dimensionali, i valori calcolati in output dalle formule regolano la configurazione del modello tridimensionale visualizzato dal software, mentre nel caso dei dati di produzione vengono restituite le coordinate numeriche da inserire in macchina per le lavorazioni di taglio e cordonatura, senza alterare la visualizzazione del modello. Le formule che legano i diversi parametri consentono inoltre di verificare a priori la correttezza e la stabilità del modello, poiché segnalano l'errore in caso di inserimento scorretto dei dati o di non rispetto di alcuni vincoli dimensionali e/o di relazione tra le parti, che sono stati stabiliti a priori attraverso la formula stessa.

I parametri sono stati categorizzati secondo la tipologia, il raggruppamento e le possibilità di modifica, informazioni propedeutiche al successivo inserimento dei dati nel software. A questo proposito, si sottolinea che la scelta sulla tipologia di parametro si è indirizzata univocamente su quelli che il software interpreta come "parametri di tipo"³, ovvero parametri che regolano e modificano le caratteristiche di tutti gli oggetti appartenenti alla stessa famiglia. La strategia adottata consente infatti di operare una gestione più efficiente sia degli aspetti di progetto, permettendo di modificare pannelli uguali a partire da un'unica finestra di dialogo, sia di quelli di produzione, poiché vincola l'utente a creare una nuova tipologia di pannello per ogni diversa configurazione; in questo modo, una volta codificati tutti i tipi di componenti presenti in un progetto, si ha una distinta puntuale dei pannelli che è necessario produrre, che vengono categorizzati in appositi abachi secondo le loro dimensioni e caratteristiche morfologiche (Cfr. **Pt. III, Cap. 2.4**).

3. Al contrario, i cosiddetti "parametri istanza", che gerarchicamente si trovano al livello inferiore rispetto al tipo, permettono di modificare le caratteristiche di singoli oggetti, senza interferire con modifiche sugli altri appartenenti allo stesso tipo.

Tab.01 - Parametrizzazione dei dati morfologico-dimensionali per la digitalizzazione in BIM dei pannelli prefabbricati in cartone
(V. Appendici, "PRM")

File	Gruppo	Parametro	Descrizione comando	Formula/Valore PAN_SW_V
PAN_SW_Parametri	PAN_SW_Dimensioni	PAN_SW_L.	Larghezza pannello	---
		PAN_SW_L.int	Larghezza interna pannello	$PAN_SW_L. - 3 * MAT_CTO_Sp.$
		PAN_SW_L.est	Larghezza esterna pannello (per modellazione PAN_SW_VS)	---
		PAN_SW_L.tb	Larghezza tubolare	$PAN_SW_L.int / PAN_N.tb + MAT_CTO_Sp./2 - PAN_Toll.tb$
		PAN_SW_L.tb.int	Larghezza tubolare interna	$PAN_SW_L.tb - 3 * MAT_CTO_Sp.$
		PAN_SW_L.tb.mod	Larghezza tubolari di modello (per modellazione PROF_SAG)	$PAN_SW_L.tb + PAN_Toll.tb$
		PAN_SW_L.tb.lat	Larghezza tubolari laterali in pannello forato per infisso	$if (PAN_INF, (PAN_SW_L.int - INF_L)/2 - PAN_Toll.tb, 0)$
		PAN_SW_H.	Altezza pannello finito	---
		PAN_SW_H.co	Altezza pannello esclusi traversi	$PAN_SW_H. - PAN_SW_L.int - PROF_TRAV_COP_H$
		PAN_SW_H.int	Altezza interna pannello (esclusi tozzetti) = altezza isolante	$PAN_SW_H.co - 2 * PROF_TOZ_H$
		PAN_SW_Sp.	Spessore pannello	---
		PAN_SW_Sp./2+toll	Metà spessore pannello meno tolleranza (modellazione PROF_SAG)	$PAN_SW_Sp./2 - PAN_Toll.$
		PAN_SW_Sp./2	Metà spessore pannello	$PAN_SW_Sp./2$
		PAN_SW_Sp.tb.est	Spessore tubolari	$PAN_SW_Sp. - 2 * MAT_CTO_Sp.$
		PAN_SW_Sp.tb.int	Spessore interno tubolari (volume vuoto)	$PAN_SW_Sp. - 4 * MAT_CTO_Sp.$
		PAN_SW_Sp.setto	Spessore setto	$3 * MAT_CTO_Sp.$
		PAN_SW_Sp.setto+toll	Spessore setto con tolleranza dimensionale	$3 * PAN_SW_L.int + PAN_Toll.tb$
		PAN_SW_VS_H.sx	Pannello PAN_SW_VS: altezza pannello lato sinistro (input)	---
		PAN_SW_VS_H.dx	Pannello PAN_SW_VS: altezza pannello lato sinistro (calcolo)	---
		PAN_SW_VS_H.co.sx	Pannello PAN_SW_VS: altezza cartone lato sinistro (calcolo)	---
		PAN_SW_VS_H.co.dx	Pannello PAN_SW_VS: altezza cartone lato destro (calcolo)	---
		PAN_SW_VS_H.co.max	Pannello PAN_SW_VS: altezza massima cartone (volume pieno)	---
		PAN_SW_VS_Offset	Pannello PAN_SW_VS: offset falda a sottrarre da altezza massima	---
		INF_H.	Altezza infisso (input)	---
		INF_L.	Larghezza infisso (input)	---
	INF_H.dv	Altezza davanzale (input)	---	
	INF_H.foro.sup	Altezza foro estrusione infisso	$if (INF_H.dv = PROF_TRAV_BASE_H, INF_H. + PROF_TRAV_INF_H, INF_H. + 2 * PROF_TRAV_INF_H)$	
	INF_H.foro.inf	Altezza da terra foro estrusione infisso	$if (INF_H.dv = PROF_TRAV_BASE_H, PROF_TRAV_BASE_H, INF_H.dv - PROF_TRAV_INF_H)$	
	PAN_SW_Dati	PAN_Toll.	Tolleranza dimensionale pannello	3 mm
		PAN_Toll.tb	Tolleranza dimensionale tubolari	2 mm
		PAN_INF	Istruzione condizionale per inserimento infisso	---
		PAN_INF.dv	Istruzione condizionale per visibilità davanzale infisso	$if (and (PAN_INF, INF_H.dv > PROF_TRAV_BASE_H), 2 > 1, 2 < 1)$
		PAN_N.tb	Numero tubolari	---
		PAN_ANG	Inclinazione falda di copertura	---
		PAN_SW_HG	Altezza giunto pannello per Hcartone > MAT_CTO_D.max	---
		PAN_SW_VS_DX	Istruzione condizionale per scelta pannello	---
		PAN_SW_VS_SX	Istruzione condizionale per scelta pannello	---
		FE_INF_d1	Dimensione mazzetta laterale FE per pannello infisso	$if (PAN_INF, (PAN_SW_L.int - INF_L)/2 + 2 * MAT_CTO_Sp., 0)$
	PAN_SW_Costi	CU_MAT_CTO	Costo unitario cartone TO (mq)	0.28
		CU_MAT_FIN.i	Costo unitario finitura lato interno	5.42
		CU_MAT_FIN.o	Costo unitario finitura lato esterno	3.64
		CU_MAT_ISO	Costo unitario materiale isolante	114.37 €/mq
		CU_MAT_LEG	Costo unitario legno	142 €/m
		CU_MAT_PVC	Costo unitario facciata tessile	22
		CT_CTO	Costo totale cartone	$CU_MAT_CTO * (MAT_CTO_FE + MAT_CTO_TB + MAT_CTO_TBlat)$
CT_FIN.i		Costo totale finitura lato interno	$CU_MAT_FIN.i * PAN_SW_FIN_Sup.i$	
CT_FIN.o	Costo totale finitura lato esterno	$CU_MAT_FIN.o * PAN_SW_FIN_Sup.o$		
CT_ISO	Costo totale isolante	$CU_MAT_ISO * PAN_SW_ISO_Volume$		
CT_LEG	Costo totale legno	$(CU_MAT_LEG * (PROF_MONT_L * PROF_MONT_N + PROF_TOZcen.inf.L * PROF_TOZcen.inf.N + PROF_TOZcen.sup.L * PROF_TOZcen.sup.N + PROF_TOZest.inf.L * PROF_TOZest.inf.N + PROF_TOZest.sup.L * PROF_TOZest.sup.N + PROF_TRAV_COP_L * PROF_TRAV_COP_N + PROF_TRAV_BASE_L * PROF_TRAV_BASE_N + PROF_TRAV_INF_L * PROF_TRAV_INF_N)) / 1000$		
PAN_SW_Produzione	FE_T1.x	Dimensione taglio FE: taglio 1	$PAN_SW_Sp. / 2 - PAN_Toll. + PAN_SW_L. + PAN_SW_Sp. - MAT_CTO_Sp. - 4 * MAT_CTO_RC$	
	FE_T1.y0	Dimensione taglio FE: taglio 1	0	
	FE_T1.y	Dimensione taglio FE: taglio 1	MAT_CTO_H	
	FE_T2.x	Dimensione taglio FE: taglio 2	$if (PAN_SW_H.co > MAT_CTO_D.max, PAN_SW_HG, PAN_SW_H.co)$	
	FEt_T2.x	Dimensione taglio FE superiore: taglio 2	$if (PAN_SW_H.co > MAT_CTO_D.max, PAN_SW_H.co - PAN_SW_HG - 10, 0)$	
	FEi_T2.x	Dimensione taglio FE interno: taglio 2	---	
	FEo_T2.x	Dimensione taglio FE esterno: taglio 2	---	
	FEit_T2.x	Dimensione taglio FE superiore interno: taglio 2	---	

Continua da pagina precedente

Formula/Valore			Tipo		Raggr.
PAN_SW_VS	PAN_SW_O				
---	---	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
$PAN_SW_L - 3 * MAT_CTO_Sp.$	$PAN_SW_L - 3 * MAT_CTO_Sp.$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
$PAN_SW_L + MAT_CTO_Sp.$		Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dimensioni
$PAN_SW_L_{int} / PAN_N.tb + MAT_CTO_Sp./2 - PAN_Toll.tb$	$PAN_SW_L_{int} / PAN_N.tb + MAT_CTO_Sp./2 - PAN_Toll.tb$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
$PAN_SW_L.tb - 3 * MAT_CTO_Sp.$	$PAN_SW_L.tb - 3 * MAT_CTO_Sp.$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
$PAN_SW_L.tb + PAN_Toll.tb$	$PAN_SW_L.tb + PAN_Toll.tb$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
$if (PAN_INF, (PAN_SW_L_{int} - INF_L)/2 - PAN_Toll.tb, 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
---	---	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
	$PAN_SW_H - PAN_SW_L_{int} - PROF_TRAV_COP_H$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
	$PAN_SW_H.co - 2 * PROF_TOZ_H$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Altro
---	---	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dimensioni
$PAN_SW_Sp./2 - PAN_Toll.$	$PAN_SW_Sp./2 - PAN_Toll.$	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dimensioni
$PAN_SW_Sp./2$	$PAN_SW_Sp./2$	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Altro
$PAN_SW_Sp. - 2 * MAT_CTO_Sp.$	$PAN_SW_Sp. - 2 * MAT_CTO_Sp.$	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dimensioni
$PAN_SW_Sp. - 4 * MAT_CTO_Sp.$	$PAN_SW_Sp. - 4 * MAT_CTO_Sp.$	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dimensioni
$3 * MAT_CTO_Sp.$	$3 * MAT_CTO_Sp.$	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dimensioni
$3 * PAN_SW_L_{int} + PAN_Toll.tb$	$3 * PAN_SW_L_{int} + PAN_Toll.tb$	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dimensioni
$if (PAN_SW_VS_SX, PAN_SW_VS_H.sx + PAN_SW_L * \tan(PAN_ANG), PAN_SW_VS_H.sx - PAN_SW_L * \tan(PAN_ANG))$		Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
$PAN_SW_VS_H.sx - PROF_TRAV_COP_H / \cos(PAN_ANG) - PROF_TRAV_BASE_H$		Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
$if (PAN_SW_VS_SX, [PAN_SW_VS_H.co.sx] + PAN_SW_VS_Offset, [PAN_SW_VS_H.co.sx] - PAN_SW_VS_Offset)$		Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
$if (PAN_SW_VS_SIN, [PAN_SW_VS_Hcar.sinistra] + PAN_SW_VS_Offset, [PAN_SW_VS_Hcar.sinistra])$		Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Altro
$PAN_SW_L_{est} * \tan(PAN_ANG)$		Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Altro
---		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
---		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
---		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
$if (INF_H.dv = PROF_TRAV_BASE_H, INF_H + PROF_TRAV_INF_H, INF_H + 2 * PROF_TRAV_INF_H)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Altro
$if (INF_H.dv = PROF_TRAV_BASE_H, PROF_TRAV_BASE_H, INF_H.dv - PROF_TRAV_INF_H)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Altro
3 mm	3 mm	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dati
2 mm	2 mm	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dati
---			Parametro tipo	Variabile	Visibilità
$if (and(PAN_INF, INF_H.dv > PROF_TRAV_BASE_H), 2 > 1, 2 < 1)$			Parametro tipo	Variabile	Visibilità
---		Intero	Parametro tipo	Variabile	Dati
---		Angolo	Parametro tipo	Variabile	Dati
---		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dati
---			Parametro tipo	Variabile	Visibilità
---			Parametro tipo	Variabile	Visibilità
$if (PAN_INF, (PAN_SW_L_{int} - INF_L)/2 + 2 * MAT_CTO_Sp., 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dati
0.28	0.28	Numero	Parametro tipo	Fisso	Dati
5.42	5.42	Numero	Parametro tipo	Fisso	Dati
3.64	3.64	Numero	Parametro tipo	Fisso	Dati
114.37 €/mq	114.37 €/mq	Numero	Parametro tipo	Fisso	Dati
142 €/m	142 €/m	Numero	Parametro tipo	Fisso	Dati
22	22	Numero	Parametro tipo	Fisso	Dati
$CU_MAT_CTO * (MAT_CTO_FE + MAT_CTO_TB + MAT_CTO_TBI at)$	$CU_MAT_CTO * (MAT_CTO_FE + MAT_CTO_TB)$	Numero	Parametro tipo	Variabile	Dati
$CU_MAT_FIN.i * PAN_SW_FIN_Sup.i$	$CU_MAT_FIN.i * PAN_SW_FIN_Sup.i$	Area	Parametro tipo	Variabile	Dati
$CU_MAT_FIN.o * PAN_SW_FIN_Sup.o$	$CU_MAT_FIN.o * PAN_SW_FIN_Sup.o$	Area	Parametro tipo	Variabile	Dati
$CU_MAT_ISO * PAN_SW_ISO_Volume$	$CU_MAT_ISO * PAN_SW_ISO_Volume$	Volume	Parametro tipo	Variabile	Dati
$([CU_MAT_CTO * (PROF_MONT_L.sx + PROF_MONT_L.dx + PROF_TOZcen.inf.L * PROF_TOZcen.inf.N. + PROF_TOZcen.sup.L * PROF_TOZcen.sup.N. + PROF_TOZest.inf.L * PROF_TOZest.inf.N. + PROF_TOZest.sup.L * PROF_TOZest.sup.N. + PROF_TRAV_COP.L * PROF_TRAV_COP.N. + PROF_TRAV_BASE.L * PROF_TRAV_BASE.N. + PROF_TRAV_INF.L * PROF_TRAV_INF.N)] / 1000)$	$([CU_MAT_LEG * (PROF_MONT_L * PROF_MONT_N. + PROF_TOZcen.inf.L * PROF_TOZcen.inf.N. + PROF_TOZcen.sup.L * PROF_TOZcen.sup.N. + PROF_TOZest.inf.L * PROF_TOZest.inf.N. + PROF_TOZest.sup.L * PROF_TOZest.sup.N. + PROF_TRAV_COP.L * PROF_TRAV_COP.N. + PROF_TRAV_BASE.L * PROF_TRAV_BASE.N. + PROF_TRAV_INF.L * PROF_TRAV_INF.N)] / 1000)$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dati
$PAN_SW_Sp. / 2 - PAN_Toll. + PAN_SW_L + PAN_SW_Sp. - MAT_CTO_Sp. - 4 * MAT_CTO_RC$	$PAN_SW_Sp. / 2 - PAN_Toll. + PAN_SW_L + PAN_SW_Sp. - MAT_CTO_Sp. - 4 * MAT_CTO_RC$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
0	0	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
MAT_CTO_H	MAT_CTO_H	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
	$if (PAN_SW_H.co > MAT_CTO_D.max, PAN_SW_HG, PAN_SW_H.co)$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
	$if (PAN_SW_H.co > MAT_CTO_D.max, PAN_SW_H.co - P$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$if (AND(PAN_SW_VS_SX, PAN_SW_VS_H.co.max < MAT_CTO_D.max), PAN_SW_VS_H.co.max - MAT_CTO_Sp. * \tan(PAN_ANG) - MAT_CTO_RH, if (AND(PAN_SW_VS_DX, PAN_SW_VS_H.co.max < MAT_CTO_D.max), PAN_SW_VS_H.co.max - MAT_CTO_RH, PAN_SW_HG))$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$if (AND(PAN_SW_VS_SX, PAN_SW_VS_H.co.max < MAT_CTO_D.max), PAN_SW_VS_H.co.max - MAT_CTO_RH, if (AND(PAN_SW_VS_DX, PAN_SW_VS_H.co.max < MAT_CTO_D.max), PAN_SW_VS_H.co.max - MAT_CTO_Sp. * \tan(PAN_ANG) - MAT_CTO_RH, PAN_SW_HG))$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$if (and(PAN_SW_VS_SX, PAN_SW_VS_H.co.max > MAT_CTO_D.max), PAN_SW_VS_H.co.max - MAT_CTO_Sp. * \tan(PAN_ANG) - MAT_CTO_RH - PAN_SW_HG - 10, if (and(PAN_SW_VS_DX, PAN_SW_VS_H.co.max > MAT_CTO_D.max), PAN_SW_VS_H.co.max - MAT_CTO_RH - PAN_SW_HG - 10, 0))$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione

Continua da pagina precedente

File	Gruppo	Parametro	Descrizione comando	Formula/Valore PAN_SW_V
		FEot_T2.x	Dimensione taglio FE superiore esterno: taglio 2	
		FE_T2.y0	Dimensione taglio FE: taglio 2	0
		FE_T2.y	Dimensione taglio FE: taglio 2	$PAN_SW_Sp. / 2 - PAN_Toll. + PAN_SW_L. + PAN_SW_Sp. - MAT_CTO_Sp. - 4 * MAT_CTO_RC$
		FEf_T3.x1	Dimensione taglio FE interno forato per infisso: taglio 3	$if (PAN_INF, PAN_SW_Sp. - MAT_CTO_Sp. + FE_INF.d1 - MAT_CTO_Sp. + INF_L. - 2 * MAT_CTO_RC, 0)$
		FEf_T3.x2	Dimensione taglio FE interno forato per infisso: taglio 3	$if (PAN_INF, FEf_T3.x1 - INF_L., 0)$
		FEf_T3.y0	Dimensione taglio FE interno forato per infisso: taglio 3	$if (PAN_INF, INF_H.foro.inf - PROF_TRAV_BASE_H, 0)$
		FEf_T3.y	Dimensione taglio FE interno forato per infisso: taglio 3	$if (PAN_INF, INF_H.foro.sup., 0)$
		FEf_T4.x1	Dimensione taglio FE interno forato per infisso: taglio 4	$if (PAN_INF, INF_H.foro.inf - PROF_TRAV_BASE_H + INF_H.foro.sup., 0)$
		FEf_T4.x2	Dimensione taglio FE interno forato per infisso: taglio 4	$if (PAN_INF, FEf_T4.x1 - INF_H.foro.sup., 0)$
		FEf_T4.y0	Dimensione taglio FE interno forato per infisso: taglio 4	$if (PAN_INF, PAN_SW_Sp. - MAT_CTO_Sp. + FE_INF.d1 - MAT_CTO_Sp. + INF_L. - 2 * MAT_CTO_RC, 0)$
		FEf_T4.y	Dimensione taglio FE interno forato per infisso: taglio 4	$if (PAN_INF, INF_L., 0)$
		FEi_T5.x	Dimensione taglio FE interno: taglio 5	
		FEit_T5.x	Dimensione taglio FE interno superiore: taglio 5	
		FEi_T5.y0	Dimensione taglio FE interno: taglio 5	
		FEi_T5.y	Dimensione taglio FE interno: taglio 5	
		FEo_T5.x	Dimensione taglio FE esterno: taglio 5	
		FEot_T5.x	Dimensione taglio FE esterno superiore: taglio 5	
		FEo_T5.y0	Dimensione taglio FE esterno: taglio 5	
		FEo_T5.y	Dimensione taglio FE esterno: taglio 5	
		FEi_T6.x	Dimensione taglio FE interno: taglio 6	
		FEit_T6.x	Dimensione taglio FE interno superiore: taglio 6	
		FEi_T6.y	Dimensione taglio FE interno: taglio 6	
		FEi_T6.y0	Dimensione taglio FE interno: taglio 6	
		FEit_T6.y0	Dimensione taglio FE interno superiore: taglio 6	
		FEo_T6.x	Dimensione taglio FE interno: taglio 6	
		FEot_T6.x	Dimensione taglio FE esterno superiore: taglio 6	
		FEo_T6.y0	Dimensione taglio FE esterno: taglio 6	
		FEot_T6.y0	Dimensione taglio FE esterno superiore: taglio 6	
		FEo_T6.y	Dimensione taglio FE esterno: taglio 6	
		FE_C1	Dimensione cordonatura fogli esterni: cordonatura 1	$PAN_SW_Sp./2 - PAN_Toll. + PAN_SW_L. - 3 * MAT_CTO_RC$
		FE_C2	Dimensione cordonatura fogli esterni: cordonatura 2	$PAN_SW_Sp./2 - PAN_Toll. - MAT_CTO_RC$
		TB_T1.x	Dimensione taglio tubolari: taglio 1	$PAN_SW_Sp.tb.est / 2 - PAN_Toll.tb + 2 * PAN_SW_L.tb + 2 * PAN_SW_Sp.tb.est - 2 * MAT_CTO_Sp. - 8 * MAT_CTO_RC$
		TB_T1.y0	Dimensione taglio tubolari: taglio 1	0
		TB_T1.y	Dimensione taglio tubolari: taglio 1	MAT_CTO_H
		TB_T2.x	Dimensione taglio tubolari: taglio 2	$if (PAN_SW_H.co > MAT_CTO_D.max, PAN_SW_HG, PAN_SW_H.co)$
		TB_T2.x	Dimensione taglio tubolari superiori: taglio 2	$if (PAN_SW_H.co > MAT_CTO_D.max, PAN_SW_H.co - PAN_SW_HG - 10, 0)$
		TB_T2.y0	Dimensione taglio tubolari: taglio 2	0
		TB_T2.y	Dimensione taglio tubolari: taglio 2	$PAN_SW_Sp.tb.est / 2 - PAN_Toll.tb + 2 * PAN_SW_L.tb + 2 * PAN_SW_Sp.tb.est - 2 * MAT_CTO_Sp. - 8 * MAT_CTO_RC$
		TBlat_T7.x	Dimensione taglio tubolari laterali: taglio 7	$if (PAN_INF, 2 * PAN_SW_Sp.tb.est + 2 * PAN_SW_L.tb.lat - 2 * MAT_CTO_Sp. - 8 * MAT_CTO_RC, 0)$
		TBlat_T7.y0	Dimensione taglio tubolari laterali: taglio 7	0
		TBlat_T7.y	Dimensione taglio tubolari laterali: taglio 7	$if (PAN_INF, MAT_CTO_D.max, 0 \text{ mm})$
		TBlat_T8.x	Dimensione taglio tubolari laterali: taglio 8	$if (PAN_INF, INF_H.foro.sup., 0)$
		TBlat_T8.y0	Dimensione taglio tubolari laterali: taglio 8	0
		TBlat_T8.y	Dimensione taglio tubolari laterali: taglio 8	$if (PAN_INF, 2 * PAN_SW_Sp.tb.est + 2 * PAN_SW_L.tb.lat - 2 * MAT_CTO_Sp. - 8 * MAT_CTO_RC, 0)$
		TB_C1	Dimensione cordonatura tubolari: cordonatura 1	$PAN_SW_L.tb + PAN_SW_Sp.tb.est + PAN_SW_L.tb + PAN_SW_Sp.tb.est - 2 * MAT_CTO_Sp. - 7 * MAT_CTO_RC$
		TB_C2	Dimensione cordonatura tubolari: cordonatura 2	$PAN_SW_Sp.tb.est + PAN_SW_L.tb + PAN_SW_Sp.tb.est - 2 * MAT_CTO_Sp. - 5 * MAT_CTO_RC$
		TB_C3	Dimensione cordonatura tubolari: cordonatura 3	$PAN_SW_L.tb + PAN_SW_Sp.tb.est - 2 * MAT_CTO_Sp. - 3 * MAT_CTO_RC$
		TB_C4	Dimensione cordonatura tubolari: cordonatura 4	$PAN_SW_L.tb - MAT_CTO_RC$

Continua da pagina precedente

Formula/Valore	PAN_SW_O	Tipo			Raggr.
$\text{if}(\text{and}(\text{PAN_SW_VS_SX}, \text{PAN_SW_VS_H.co.max} > \text{MAT_CTO_D.max}), \text{PAN_SW_VS_H.co.max} - \text{MAT_CTO_RH} - \text{PAN_SW_HG} - 10, \text{if}(\text{and}(\text{PAN_SW_VS_DX}, \text{PAN_SW_VS_H.co.max} > \text{MAT_CTO_D.max}), \text{PAN_SW_VS_H.co.max} - \text{MAT_CTO_Sp} * \tan(\text{PAN_ANG}) - \text{MAT_CTO_RH} - \text{PAN_SW_HG} - 10, 0))$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
0	0	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{PAN_SW_Sp} / 2 - \text{PAN_Toll} + \text{PAN_SW_L} + \text{PAN_SW_Sp} - \text{MAT_CTO_Sp} - 4 * \text{MAT_CTO_RC}$	$\text{PAN_SW_Sp} / 2 - \text{PAN_Toll} + \text{PAN_SW_L} + \text{PAN_SW_Sp} - \text{MAT_CTO_Sp} - 4 * \text{MAT_CTO_RC}$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{PAN_SW_Sp} - \text{MAT_CTO_Sp} + \text{FE_INF.d1} - \text{MAT_CTO_Sp} + \text{INF_L} - 2 * \text{MAT_CTO_RC}, 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{FEF_T3.x1} - \text{INF_L}, 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{INF_H.foro.inf} - \text{PROF_TRAV_BASE_H}, 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{INF_H.foro.sup}, 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{INF_H.foro.inf} - \text{PROF_TRAV_BASE_H} + \text{INF_H.foro.sup}, 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{FEF_T4.x1} - \text{INF_H.foro.sup}, 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{PAN_SW_Sp} - \text{MAT_CTO_Sp} + \text{FE_INF.d1} - \text{MAT_CTO_Sp} + \text{INF_L} - 2 * \text{MAT_CTO_RC}, 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{INF_L}, 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_SW_VS_SX}, \text{PAN_SW_VS_H.co.sx}, \text{PAN_SW_VS_H.co.dx} + \text{MAT_CTO_Sp} * \tan(\text{PAN_ANG}))$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{AND}(\text{PAN_SW_VS_SX}, \text{PAN_SW_VS_H.co.max} > \text{MAT_CTO_D.max}), \text{PAN_SW_VS_H.co.sx} - \text{PAN_SW_HG} - 10, \text{if}(\text{and}(\text{PAN_SW_VS_DX}, \text{PAN_SW_VS_H.co.max} > \text{MAT_CTO_D.max}), \text{PAN_SW_VS_H.co.dx} + \text{MAT_CTO_Sp} * \tan(\text{PAN_ANG}) - \text{PAN_SW_HG} - 10, 0))$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
0		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_SW_VS_SX}, \text{PAN_SW_Sp} / 2 - \text{PAN_Toll} - 2 * \text{MAT_CTO_RC}, \text{PAN_SW_Sp} - \text{MAT_CTO_Sp} - 2 * \text{MAT_CTO_RC})$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_SW_VS_SX}, \text{PAN_SW_VS_H.co.sx} + \text{MAT_CTO_Sp} * \tan(\text{PAN_ANG}), \text{PAN_SW_VS_H.co.dx})$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{AND}(\text{PAN_SW_VS_SX}, \text{PAN_SW_VS_H.co.max} > \text{MAT_CTO_D.max}), \text{PAN_SW_VS_H.co.sx} + \text{MAT_CTO_Sp} * \tan(\text{PAN_ANG}) - \text{PAN_SW_HG} - 10, \text{if}(\text{AND}(\text{PAN_SW_VS_DX}, \text{PAN_SW_VS_H.co.max} > \text{MAT_CTO_D.max}), \text{PAN_SW_VS_H.co.dx} - \text{PAN_SW_HG} - 10, 0))$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_SX}, \text{PAN_SW_Sp} - \text{MAT_CTO_Sp} - 2 * \text{MAT_CTO_RC}, \text{PAN_SW_Sp} / 2 - \text{PAN_Toll} - 2 * \text{MAT_CTO_RC})$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{FEI_T5.x} * \cos(\text{PAN_ANG}) + 100 - \text{FEI_T5.y} * \sin(\text{PAN_ANG})$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{FEI_T5.x} * \cos(\text{PAN_ANG}) + 100 - \text{FEI_T5.y} * \sin(\text{PAN_ANG})$					
$(\text{PAN_SW_L} - \text{MAT_CTO_Sp} / 2) / \cos(\text{PAN_ANG})$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{FEI_T5.x} * \sin(\text{PAN_ANG}) + \text{FEI_T5.y} * \cos(\text{PAN_ANG})$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{FEI_T5.x} * \sin(\text{PAN_ANG}) + \text{FEI_T5.y} * \cos(\text{PAN_ANG})$					
$\text{FEo_T5.x} * \cos(\text{PAN_ANG}) + 100 - \text{FEo_T5.y} * \sin(\text{PAN_ANG})$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{FEo_T5.x} * \cos(\text{PAN_ANG}) + 100 - \text{FEo_T5.y} * \sin(\text{PAN_ANG})$					
$\text{FEo_T5.x} * \sin(\text{PAN_ANG}) + \text{FEo_T5.y} * \cos(\text{PAN_ANG})$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{FEo_T5.x} * \sin(\text{PAN_ANG}) + \text{FEo_T5.y} * \cos(\text{PAN_ANG})$					
$(\text{PAN_SW_L} - \text{MAT_CTO_Sp} / 2) / \cos(\text{PAN_ANG})$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{PAN_SW_Sp} / 2 - \text{PAN_Toll} + \text{PAN_SW_L} - 3 * \text{MAT_CTO_RC}$	$\text{PAN_SW_Sp} / 2 - \text{PAN_Toll} + \text{PAN_SW_L} - 3 * \text{MAT_CTO_RC}$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{PAN_SW_Sp} / 2 - \text{PAN_Toll} - \text{MAT_CTO_RC}$	$\text{PAN_SW_Sp} / 2 - \text{PAN_Toll} - \text{MAT_CTO_RC}$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{PAN_SW_Sp.tb.est} / 2 - \text{PAN_Toll.tb} + 2 * \text{PAN_SW_L.tb} + 2 * \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp} - 8 * \text{MAT_CTO_RC}$	$\text{PAN_SW_Sp.tb.est} / 2 - \text{PAN_Toll.tb} + 2 * \text{PAN_SW_L.tb} + 2 * \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp} - 8 * \text{MAT_CTO_RC}$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
0	0	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
MAT_CTO_H	MAT_CTO_H	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_SW_VS_H.co.max} > \text{MAT_CTO_D.max}, \text{PAN_SW_HG}, \text{PAN_SW_VS_H.co.max})$	$\text{if}(\text{PAN_SW_H.co} > \text{MAT_CTO_D.max}, \text{PAN_SW_HG}, \text{PAN_SW_H.co})$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_SW_VS_H.co.max} > \text{MAT_CTO_D.max}, \text{PAN_SW_VS_H.co.max} - \text{PAN_SW_HG} - 10, 0)$	$\text{if}(\text{PAN_SW_H.co} > \text{MAT_CTO_D.max}, \text{PAN_SW_H.co} - \text{PAN_SW_HG} - 10, 0)$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
0	0	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{PAN_SW_Sp.tb.est} / 2 - \text{PAN_Toll.tb} + 2 * \text{PAN_SW_L.tb} + 2 * \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp} - 8 * \text{MAT_CTO_RC}$	$\text{PAN_SW_Sp.tb.est} / 2 - \text{PAN_Toll.tb} + 2 * \text{PAN_SW_L.tb} + 2 * \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp} - 8 * \text{MAT_CTO_RC}$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_INF}, 2 * \text{PAN_SW_Sp.tb.est} + 2 * \text{PAN_SW_L.tb.lat} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp} - 8 * \text{MAT_CTO_RC}, 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
0		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{MAT_CTO_D.max}, 0 \text{ mm})$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{INF_H.foro.sup}, 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
0		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{if}(\text{PAN_INF}, 2 * \text{PAN_SW_Sp.tb.est} + 2 * \text{PAN_SW_L.tb.lat} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp} - 8 * \text{MAT_CTO_RC}, 0)$		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{PAN_SW_L.tb} + \text{PAN_SW_Sp.tb.est} + \text{PAN_SW_L.tb} + \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp} - 7 * \text{MAT_CTO_RC}$	$\text{PAN_SW_L.tb} + \text{PAN_SW_Sp.tb.est} + \text{PAN_SW_L.tb} + \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp} - 7 * \text{MAT_CTO_RC}$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{PAN_SW_Sp.tb.est} + \text{PAN_SW_L.tb} + \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp} - 5 * \text{MAT_CTO_RC}$	$\text{PAN_SW_Sp.tb.est} + \text{PAN_SW_L.tb} + \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp} - 5 * \text{MAT_CTO_RC}$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{PAN_SW_L.tb} + \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp} - 3 * \text{MAT_CTO_RC}$	$\text{PAN_SW_L.tb} + \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp} - 3 * \text{MAT_CTO_RC}$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
$\text{PAN_SW_L.tb} - \text{MAT_CTO_RC}$	$\text{PAN_SW_L.tb} - \text{MAT_CTO_RC}$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione

Continua da pagina precedente

File	Gruppo	Parametro	Descrizione comando	Formula/Valore
PAN_SW_Parametri	PAN_SW_Produzione	TBlat_C1	Dimensione cordonatura tubolari laterali: cordonatura 1	$\text{if}(\text{PAN_INF}, 2 * \text{PAN_SW_L.tb.lat} + 2 * \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp.} - 7 * \text{MAT_CTO_RC}, 0)$
		TBlat_C2	Dimensione cordonatura tubolari laterali: cordonatura 2	$\text{if}(\text{PAN_INF}, 2 * \text{PAN_SW_Sp.tb.est} + \text{PAN_SW_L.tb.lat} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp.} - 5 * \text{MAT_CTO_RC}, 0)$
		TBlat_C3	Dimensione cordonatura tubolari laterali: cordonatura 3	$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{PAN_SW_L.tb.lat} + \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - 2 * \text{MAT_CTO_Sp.} - 3 * \text{MAT_CTO_RC}, 0)$
		TBlat_C4	Dimensione cordonatura tubolari laterali: cordonatura 4	$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{PAN_SW_Sp.tb.est} - \text{MAT_CTO_Sp.} - \text{MAT_CTO_RC}, 0)$
		TBb_H	Dimensione taglio tubolari inferiori: altezza TBb	$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{INF_H.foro.inf} - \text{PROF_TRAV_BASE_H}, 0)$
		TBt_H	Dimensione taglio tubolari inferiori: altezza TBt	$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{PAN_SW_H.co} - \text{INF_H.foro.inf} - \text{PROF_TRAV_BASE_H}, 0)$
		TBt.1_H	Dimensione taglio tubolari superiori in PAN_SW_VS: altezza TB.1 per PAN_SW_VS_H.co.max > MAT_CTO_D.max	
		TB.1_H	Dimensione taglio tubolari superiori in PAN_SW_VS: altezza 1	
		TB.2_H	Dimensione taglio tubolari superiori in PAN_SW_VS: altezza 2	
		TB.3_H	Dimensione taglio tubolari superiori in PAN_SW_VS: altezza 3	
		TB.4_H	Dimensione taglio tubolari superiori in PAN_SW_VS: altezza 4 lato destro	
		TB.4_H2	Dimensione taglio tubolari superiori in PAN_SW_VS: altezza 4 lato sinistro	
		PAN_SW_N_FE	Quantità FE per singolo pannello	$\text{if}(\text{PAN_SW_H.co} > \text{MAT_CTO_D.max}, 4, 2)$
		PAN_SW_N_TB	Quantità TB per singolo pannello	$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{roundup}(\text{PAN_N.tb} * 2 / 3), \text{PAN_N.tb})$
		PAN_SW_N_TBlat	Quantità TBlat per singolo pannello	$\text{if}(\text{PAN_INF}, 2, 0)$
		MAT_CTO_FE	Consumo cartone per FE (numero di fogli)	$\text{if}(\text{FE_T2.x} < \text{MAT_CTO_D.max} / 2, 1, 2)) + 2$
		MAT_CTO_TB	Consumo cartone per TB (numero di fogli)	$\text{if}(\text{TB_T1.x} < \text{MAT_CTO_D.max}, \text{PAN_SW_N.tb} / 2, \text{PAN_SW_N.tb}) + \text{if}(\text{TBt_T2.x} < \text{MAT_CTO_D.max} / 2, \text{PAN_SW_N.tb} / 2, \text{PAN_SW_N.tb})$
		MAT_CTO_TBlat	Consumo cartone per Tblat (numero di fogli)	$\text{if}(\text{TBlat_T8.x} < \text{MAT_CTO_D.max}, 1 * \text{PAN_SW_N.TBlat}, 2 * \text{PAN_SW_N.TBlat})$
		PROF_MONT_L	Lunghezza profilo montanti	PAN_SW_H.co
		PROF_MONT_L.sx	Lunghezza profilo montanti PAN_SW_VS: montante sinistro	
		PROF_MONT_L.dx	Lunghezza profilo montanti PAN_SW_VS: montante destro	
		PROF_MONT_N.	Numero montanti per pannello	2
		PROF_TOZcen.inf.L.	Lunghezza tozzetto centrale inferiore	$\text{if}(\text{and}(\text{PAN_INF}, \text{INF_H.dv} < \text{PROF_TRAV_BASE_H}), 0, \text{PAN_SW_L.tb.int})$
		PROF_TOZcen.inf.N.	Numero tozzetti centrali inferiori per singolo pannello	$\text{if}(\text{and}(\text{PAN_INF}, \text{INF_H.dv} < \text{PROF_TRAV_BASE_H}), 0, \text{PAN_N.tb} - 2)$
		PROF_TOZcen.sup.L	Lunghezza tozzetto centrale superiore	PAN_SW_L.tb.int
		PROF_TOZcen.sup.N.	Numero tozzetti centrali per singolo pannello	PAN_N.tb - 2
		PROF_TOZest.inf.L.	Lunghezza tozzetto esterno inferiore	$\text{if}(\text{and}(\text{PAN_INF}, \text{INF_H.dv} < \text{PROF_TRAV_BASE_H}), 0, \text{PAN_SW_L.tb.int} - \text{PROF_MONT_H})$
		PROF_TOZest.inf.N.	Numero tozzetti esterni inferiori per singolo pannello	$\text{if}(\text{and}(\text{PAN_INF}, \text{INF_H.dv} < \text{PROF_TRAV_BASE_H}), 0, 2)$
		PROF_TOZest.sup.L	Lunghezza tozzetto esterno superiore	PAN_SW_L.tb.int - PROF_MONT_H
		PROF_TOZest.sup.N.	Numero tozzetti esterni superiori per singolo pannello	2
		PROF_TRAV_COP_L.	Lunghezza trave di copertura	PAN_SW_L.
		PROF_TRAV_COP_N.	Numero travi di copertura per pannello	1
		PROF_TRAV_BASE_L.	Lunghezza trave di base	PAN_SW_L.
		PROF_TRAV_BASE_N.	Numero travi di base per pannello	1
		PROF_TRAV_INF_L.	Lunghezza travetti infisso (cornice: davanzale+architrave)	$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{INF_L}, 0 \text{ mm})$
		PROF_TRAV_INF_N.	Numero travetti infisso (cornice: davanzale+architrave) per pannello	$\text{if}(\text{PAN_INF}, 2, 0)$
		PAN_SW_FIN_Sup.i	Superficie di finitura lato interno	$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{PAN_SW_L} * \text{PAN_SW_H.co} - \text{INF_H.foro.sup} * \text{INF_L}, \text{PAN_SW_L} * \text{PAN_SW_H.co})$
		PAN_SW_FIN_Sup.o	Superficie di finitura lato esterno	$\text{if}(\text{PAN_INF}, \text{PAN_SW_L} * \text{PAN_SW_H.co} - \text{INF_H.foro.sup} * \text{INF_L}, \text{PAN_SW_L} * \text{PAN_SW_H.co})$
		PAN_SW_ISO_Volume	Volume di insufflaggio isolante	$\text{if}(\text{PAN_INF}, (\text{PAN_N.tb} - 2) * \text{PAN_SW_L.tb.int} * \text{PAN_SW_Sp.tb.int} * (\text{PAN_SW_H.co} - 2 * \text{PROF_TOZ_H}) + 2 * ((\text{PAN_SW_L.tb.int} - \text{PROF_MONT_H}) * \text{PAN_SW_Sp.tb.int} * (\text{PAN_SW_H.co} - 2 * \text{PROF_TOZ_H})) - (\text{INF_H.foro.sup} * \text{INF_L} * \text{PAN_SW_Sp.tb.int}), (\text{PAN_N.tb} - 2) * \text{PAN_SW_L.tb.int} * \text{PAN_SW_Sp.tb.int} * (\text{PAN_SW_H.co} - 2 * \text{PROF_TOZ_H}) + 2 * ((\text{PAN_SW_L.tb.int} - \text{PROF_MONT_H}) * \text{PAN_SW_Sp.tb.int} * (\text{PAN_SW_H.co} - 2 * \text{PROF_TOZ_H}))) * 1.15$
		PAN_LST_AL_L	Lunghezza listello di alluminio per copertura giunto	$\text{if}(\text{PAN_SW_H.co} > \text{MAT_CTO_D.max}, 2 * \text{PAN_SW_L}, 0)$
PAN_LST_TO_1cm_L	Lunghezza listello cartone TO per giunto pannelli	$\text{if}(\text{PAN_SW_H.co} > \text{MAT_CTO_D.max}, 2 * \text{PAN_SW_L}, 0)$		
PAN_LST_DO_1cm_L	Lunghezza listello cartone DO per giunto pannelli	$\text{if}(\text{PAN_SW_H.co} > \text{MAT_CTO_D.max}, 2 * \text{PAN_SW_L}, 0)$		

Continua da pagina precedente

Formula/Valore	PAN_SW_O	Tipo			Raggr.
if (PAN_INF, 2*PAN_SW_L.tb.lat + 2*PAN_SW_Sp.tb.est - 2*MAT_CTO_Sp. - 7*MAT_CTO_RC, 0)		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_INF, 2*PAN_SW_Sp.tb.est + PAN_SW_L.tb.lat - 2*MAT_CTO_Sp. - 5*MAT_CTO_RC, 0)		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_INF, PAN_SW_L.tb.lat + PAN_SW_Sp.tb.est - 2*MAT_CTO_Sp. - 3*MAT_CTO_RC, 0)		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_INF, PAN_SW_Sp.tb.est - MAT_CTO_Sp. - MAT_CTO_RC, 0)		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_INF, INF_H.foro.inf - PROF_TRAV_BASE_H, 0)		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_SW_VS_SX, PAN_SW_VS_H.co.max - 2 * MAT_CTO_Sp. * tan(PAN_ANG) - INF_H.foro.sup - INF_H.foro.inf - PROF_TRAV_BASE_H, PAN_SW_VS_H.co.dx + 2 * MAT_CTO_Sp. * tan(PAN_ANG) - INF_H.foro.sup - INF_H.foro.inf - PROF_TRAV_BASE_H)		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_SW_VS_SX, PAN_SW_VS_H.co.max - 2 * MAT_CTO_Sp. * tan(PAN_ANG), PAN_SW_VS_H.co.dx + 2 * MAT_CTO_Sp. * tan(PAN_ANG))		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_SW_VS_SX, TB.1_H - PAN_SW_L.tb*tan(PAN_ANG), TB.1_H + PAN_SW_L.tb*tan(PAN_ANG))		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_SW_VS_SX, TB.2_H - PAN_SW_L.tb*tan(PAN_ANG), TB.2_H + PAN_SW_L.tb*tan(PAN_ANG))		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_SW_VS_SX, TB.3_H - PAN_SW_L.tb*tan(PAN_ANG), TB.3_H - PAN_SW_L.tb*tan(PAN_ANG))		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_SW_VS_SX, TB.4_H - PAN_SW_L.tb*tan(PAN_ANG), TB.4_H + PAN_SW_L.tb*tan(PAN_ANG))		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_SW_VS_H.co.max > MAT_CTO_D.max, 4, 2)	if (PAN_SW_H.co > MAT_CTO_D.max, 4, 2)	Intero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
if (PAN_INF, roundup(PAN_N.tb * 2 / 3), PAN_N.tb)	PAN_N.tb	Intero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
if (PAN_INF, 2, 0)		Intero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
if (or(FEIT_T2.x < MAT_CTO_D.max / 2, FEOT_T2.x < MAT_CTO_D.max / 2, 1, 2)) + 2	if (FEIT_T2.x < MAT_CTO_D.max / 2, 1, 2)) + 2	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
if (TB_T1.x < MAT_CTO_D.max, PAN_SW_N.TB / 2, PAN_SW_N.TB) + if (TB_T2.x < MAT_CTO_D.max / 2, PAN_SW_N.TB / 2, PAN_SW_N.TB)	if (TB_T1.x < MAT_CTO_D.max, PAN_SW_N.TB / 2, PAN_SW_N.TB) + if (TB_T2.x < MAT_CTO_D.max / 2, PAN_SW_N.TB / 2, PAN_SW_N.TB)	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
if (TBlat_T8.x < MAT_CTO_D.max, 1 * PAN_SW_N.TBlat, 2 * PAN_SW_N.TBlat)		Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
PAN_SW_VS_H.co.sx	PAN_SW_H.co	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
PAN_SW_VS_H.co.dx		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
2	2	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
if (and (PAN_INF, INF_H.dv < PROF_TRAV_BASE_H), 0, PAN_SW_L.tb.int)	PAN_SW_L.tb.int	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (and (PAN_INF, INF_H.dv < PROF_TRAV_BASE_H), 0, PAN_N.tb - 2)	PAN_N.tb - 2	Numero	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
PAN_SW_L.tb.int / cos(PAN_ANG) - PROF_TOZ_H * tan(PAN_ANG)	PAN_SW_L.tb.int	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
PAN_N.tb - 2	PAN_N.tb - 2	Numero	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (and (PAN_INF, INF_H.dv < PROF_TRAV_BASE_H), 0, PAN_SW_L.tb.int - PROF_MONT_H)	PAN_SW_L.tb.int - PROF_MONT_H	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
if (and (PAN_INF, INF_H.dv < PROF_TRAV_BASE_H), 0, 2)	2	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
(PAN_SW_L.tb.int - PROF_MONT_H) / cos(PAN_ANG) - PROF_TOZ_COP_H * tan(PAN_ANG)	PAN_SW_L.tb.int - PROF_MONT_H	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
2	2	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
PAN_SW_L.est / cos(PAN_ANG)	PAN_SW_L.	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
1	1	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
PAN_SW_L.	PAN_SW_L.	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
1	1	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
if (PAN_INF, INF_L, 0 mm)		Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_INF, 2, 0)		Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
if (PAN_INF, PAN_SW_L. * PAN_SW_VS_H.co.max - (PAN_SW_L. * PAN_SW_VS_Offset/2) - INF_H.foro.sup * INF_L, PAN_SW_L. * PAN_SW_VS_H.co.max - (PAN_SW_L. * PAN_SW_VS_Offset/2))	PAN_SW_L. * PAN_SW_H.co	Area	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (PAN_INF, PAN_SW_L. * PAN_SW_VS_H.co.max - (PAN_SW_L. * PAN_SW_VS_Offset/2) - INF_H.foro.sup * INF_L, PAN_SW_L. * PAN_SW_VS_H.co.max - (PAN_SW_L. * PAN_SW_VS_Offset/2))	PAN_SW_L. * PAN_SW_H.co	Area	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
((if (PAN_INF, (PAN_N.tb - 2) * PAN_SW_L.tb.int * PAN_SW_Sp.tb.int * (PAN_SW_VS_H.co.max - 2 * PROF_TOZ_H) + 2 * (PAN_SW_L.tb.int - PROF_MONT_H) * PAN_SW_Sp.tb.int * (PAN_SW_VS_H.co.max - 2 * PROF_TOZ_H) - (PAN_SW_L.tb.int * PAN_N.tb * (PAN_SW_VS_Offset)) / 2 * PAN_SW_Sp.tb.int - (INF_H.foro.sup * INF_L * PAN_SW_Sp.tb.int), (PAN_N.tb - 2) * PAN_SW_L.tb.int * PAN_SW_Sp.tb.int * (PAN_SW_VS_H.co.max - 2 * PROF_TOZ_H) + 2 * (PAN_SW_L.tb.int - PROF_MONT_H) * PAN_SW_Sp.tb.int * (PAN_SW_VS_H.co.max - 2 * PROF_TOZ_H) - (PAN_SW_L.tb.int * PAN_N.tb * (PAN_SW_VS_Offset)) / 2 * PAN_SW_Sp.tb.int)) * 1.15	((PAN_N.tb - 2) * PAN_SW_L.tb.int * PAN_SW_Sp.tb.int * (PAN_SW_VS_H.co - 2 * PROF_TOZ_H) + 2 * (PAN_SW_L.tb.int - PROF_MONT_H) * PAN_SW_Sp.tb.int * (PAN_SW_VS_H.co - 2 * PROF_TOZ_H))	Volume	Parametro istanza	Variabile	Costruzione
if (OR (PAN_SW_VS_H.co.dx > MAT_CTO_D.max, PAN_SW_VS_H.co.sx > MAT_CTO_D.max), 2 * PAN_SW_L, 0)	if (PAN_SW_H.co > MAT_CTO_D.max, 2 * PAN_SW_L, 0)	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (OR (PAN_SW_VS_H.co.dx > MAT_CTO_D.max, PAN_SW_VS_H.co.sx > MAT_CTO_D.max), 2 * PAN_SW_L, 0)	if (PAN_SW_H.co > MAT_CTO_D.max, 2 * PAN_SW_L, 0)	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione
if (OR (PAN_SW_VS_H.co.dx > MAT_CTO_D.max, PAN_SW_VS_H.co.sx > MAT_CTO_D.max), 2 * PAN_SW_L, 0)	if (PAN_SW_H.co > MAT_CTO_D.max, 2 * PAN_SW_L, 0)	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Costruzione

→ Cfr. Fig.16, pp.296-297

Tab.02 - Parametrizzazione dei dati relativi ai profili in legno inseriti all'interno dei pannelli prefabbricati (V. Appendici, "PRM")

File	Gruppo	Parametro	Descrizione	Formula	Tipo			Raggr.
PROF_Parametri	PROF_Dimensioni	PROF_TRAV_BASE_B		---	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
		PROF_TRAV_BASE_H		---	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
		PROF_MONT_B		---	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
		PROF_MONT_H		---	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
		PROF_TRAV_COP_B		---	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
		PROF_TRAV_COP_H		---	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
		PROF_TRAV_COP_Dt	Dimensione sezione profili	$\frac{PROF_TRAV_COP_H}{\cos(PAN_ANG)}$	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
		PROF_TOZ_B		---	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
		PROF_TOZ_H		---	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
		PROF_TOZ_B/2		$\frac{PROF_TOZ_B}{2}$	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
		PROF_TOZ_B/2		$-\frac{PROF_TOZ_B}{2}$	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
		PROF_TRAV_INF_B		---	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni
		PROF_TRAV_INF_H		---	Lunghezza	Parametro istanza	Variabile	Dimensioni

Tab.03 - Parametrizzazione dei dati morfologico-dimensionali relativi alle piastre di ancoraggio in acciaio (V. Appendici, "PRM")

File	Gruppo	Parametro	Descrizione	Formula	Tipo			Raggr.
PSTR_Parametri	PSTR_Dimensioni	PSTR_ANG	Angolo inclinazione piastra	---	Angolo	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
		PSTR_BASE_B	Dimensione piastra di base	---	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
		PSTR_BASE_H	Dimensione piastra di base	---	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
		PSTR_FORO	Diametro fori	---	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
		PSTR_PASSO_B	Distanza fori	---	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
		PSTR_PASSO_H	Distanza fori	---	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
		PSTR_SP	Spessore piastra	---	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni
	PSTR_Ancoraggi	BARRE_M8X200	Quantità barre per singola piastra	$if(PSTR_C, 3, 6)$	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
		BARRE_M10X200	Quantità barre per singola piastra	$if(PSTR_C, 3, 0)$	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
		BULLONI_M8X40	Quantità bulloni per singola piastra	$if(PSTR_C, 2, 4)$	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
		DADI_M8	Quantità dadi per singola piastra	$BARRE_M8X200 + BULLONI_M8X40$	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
		DADI_M10	Quantità dadi per singola piastra	$BARRE_M10X200$	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
		RONDELLE_8.4X16	Quantità rondelle per singola piastra	$BARRE_M8X200$	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
	PSTR_Costi	PSTR_Costo	Costo unitario piastre	25	Numero	Parametro tipo	Fisso	Costruzione
Parametri locali (modellazione famiglia)	PSTR_INCL	Inclinazione piastra collegamento	$90^\circ - PSTR_ANG$	Angolo	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni	
	PSTR_FORO_R	Raggio fori	$\frac{PSTR_FORO}{2}$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni	
	PSTR_RIF_a	Dimensioni riferimento per modellazione ancoraggio	---	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni	
	PSTR_RIF_b		$PSTR_BASE_H + PSTR_RIF_a$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni	
	PSTR_RIF_c		$PSTR_RIF_a + (PSTR_BASE_H - PSTR_PASSO_H) / 2$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni	
	PSTR_RIF_d		---	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dimensioni	

Tab.04 - Parametrizzazione dei dati relativi ai materiali costitutivi dei pannelli prefabbricati (V. Appendici, "PRM")

File	Gruppo	Parametro	Descrizione	Formula	Tipo			Raggr.	
MAT_Parametri	MAT_Dati	MAT_CDO_Sp.	Spessore cartone DO	10 mm	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dati	
		MAT_CTO_Sp.	Spessore cartone TO	14 mm	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dati	
		MAT_CTO_2Sp.	Doppio spessore cartone TO	$MAT_CTO_Sp. * 2$	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dati	
		MAT_CTO_2Sp.+toll.	Doppio spessore cartone TO + tolleranza TB (per modellazione setto in PROF_SAG)	$2 * MAT_CTO_Sp. + PAN_Toll.tb$	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dati	
		MAT_CDO_RC	Fattore riduzione cartone DO per cordonatura	2 mm	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dati	
		MAT_CTO_RC	Fattore riduzione cartone TO per cordonatura	2.5 mm	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dati	
		MAT_CTO_RH	Fattore riduzione altezza aletta FE per pannello VS	$(MAT_CTO_Sp./2) * \tan(PAN_ANG)$	Lunghezza	Parametro tipo	Fisso	Dati	
		MAT_CTO_D.cd	Dimensione foglio cartone TO nella direzione CD (cross direction)	2400 mm	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dati	
		MAT_CTO_D.md	Dimensione foglio cartone TO nella direzione MD (machine direction)	3100 mm	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dati	
		MAT_CTO_CD	Direzione di lavorazione/inserimento foglio in macchina	$if(MAT_CTO_MD, 2 < 1, 2 > 1)$	Si/No	Parametro tipo	Variabile	Dati	
		MAT_CTO_MD	Direzione di lavorazione/inserimento foglio in macchina	---	Si/No	Parametro tipo	Variabile	Dati	
		MAT_CTO_D.max	Dimensione massima foglio	$if(MAT_CTO_MD, MAT_CTO_D.cd, MAT_CTO_D.md)$	Lunghezza	Parametro tipo	Variabile	Dati	
		MAT_Materiali	MAT_PAN_CO	Materiale: cartone	---	Materiale	Parametro tipo	Variabile	Materiali e finiture
			MAT_PAN_ISO	Materiale: isolante	---	Materiale	Parametro tipo	Variabile	Materiali e finiture
	MAT_PAN_TRAV		Materiale: travi/travetti (profili)	---	Materiale	Parametro tipo	Variabile	Materiali e finiture	
	Parametri locali (modellazione famiglia)	MAT_PAN_FIN.i	Materiale: finitura lato interno	---	Materiale	Parametro tipo	Variabile	Materiali e finiture	
		MAT_PAN_FIN.o	Materiale: finitura lato esterno	---	Materiale	Parametro tipo	Variabile	Materiali e finiture	
MAT_INF_T		Telaio	---	Materiale	Parametro istanza	Variabile	Materiali e finiture		
MAT_INF_VT		Vetro	---	Materiale	Parametro istanza	Variabile	Materiali e finiture		
MAT_INF_DV		Davanzale	---	Materiale	Parametro istanza	Variabile	Materiali e finiture		
MAT_INF_MN	Maniglia	---	Materiale	Parametro istanza	Variabile	Materiali e finiture			

- Modellazione delle famiglie e caratterizzazione delle famiglie di oggetti BIM.** L'ultimo passaggio della fase di digitalizzazione dei componenti è stata la modellazione tridimensionale e parametrica dei pannelli, con conseguente inserimento dei dati descritti ai punti precedenti nella forma di parametri all'interno del software Autodesk® Revit. I pannelli prefabbricati in cartone sono stati sviluppati digitalmente nella forma di "Famiglia⁴ caricabile" che, a differenza delle "Famiglie di sistema" già integrate nelle librerie del software BIM, possono essere inserite e successivamente richiamate nel progetto a partire da librerie esterne, e possono essere messe a disposizione online per essere importate e utilizzate dai progettisti nei loro modelli.

La fase di modellazione ha richiesto prioritariamente la decisione circa il livello di approfondimento delle informazioni da riprodurre. Si è quindi fatto riferimento alla norma **UNI 11337-4: 2017** che oggi rappresenta l'apparato normativo di riferimento per l'uso del BIM in Italia, elaborato sulla base delle linee guida internazionali. Il testo norma gli aspetti relativi al livello di dettaglio dei modelli digitalizzati in BIM attraverso la classificazione del cosiddetto Level of Development (LOD), ovvero il "Livello di sviluppo dell'oggetto". A questo proposito, è importante precisare che il LOD sintetizza i due diversi aspetti della modellazione informativa (Information Modelling), ovvero: (1) il Livello di dettaglio degli Oggetti come attributi Geometrici (LOG) e (2) il Livello di dettaglio degli oggetti come attributi Informativi (LOI), che rappresentano il grado di approfondimento delle due macro-categorie di dati contenuti nel modello. Mettendo insieme questi due elementi, la norma UNI italiana prevede una scala di sette livelli di LOD con livello di approfondimento crescente, ovvero (Fig.12):

- LOD A: oggetto simbolico;
- LOD B: oggetto generico;
- LOD C: oggetto definito;
- LOD D: oggetto dettagliato;
- LOD E: oggetto specifico;
- LOD F: oggetto eseguito (*as built*);
- LOD G: oggetto aggiornato (manutenzione e gestione).




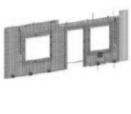
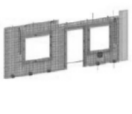
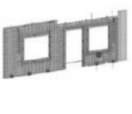
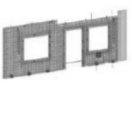
LOD A	LOD B	LOD C	LOD D	LOD E	LOD F	LOD G
						
Geometria Elemento strutturale bidimensionale verticale o pseudoverticale rappresentato mediante un simbolo 2D.	Geometria Elemento strutturale bidimensionale verticale o pseudoverticale rappresentato mediante un solido di estrusione abbozzato con aperture.	Geometria Elemento strutturale bidimensionale verticale o pseudoverticale rappresentato mediante un solido avente dimensioni calcolate secondo la normativa tecnica.	Geometria Elemento strutturale bidimensionale verticale o pseudoverticale rappresentato mediante un solido avente dimensioni pari alle dimensioni reali. Sono modellate tutte le armature in posizione corretta e sono posizionati degli inserti 3D tipici.	Geometria Elemento strutturale bidimensionale verticale o pseudoverticale rappresentato mediante un solido avente dimensioni pari alle dimensioni reali. Sono incluse tutte le armature in posizione corretta, gli inserti specifici del produttore, i dati specifici del fornitore dei materiali e delle armature.	Geometria Come LOD E (rilievo di quanto eseguito).	Geometria Nuovi interventi: Come LOD F (con aggiornamenti) Manutenzione e gestione su elementi esistenti: Come LOD C o D (a parte da).
Oggetto Simboli grafici 2D	Oggetto Solido 3D	Oggetto Solido 3D complesso	Oggetto Solidi 3D complessi	Oggetto Solidi 3D complessi	Oggetto Solidi 3D complessi	Oggetto Solidi 3D complessi
Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Posizionamento di massima 	Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Materiali ipotizzabili • Incidenza di armatura standard 	Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Materiali da calcolo • Incidenza di armatura calcolata 	Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Armatura 3D • Inserti 3D tipici 	Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Inserti 3D reali • Gestione dei getti 	Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Certificati di collaudo • Piano di manutenzione 	Caratteristiche <ul style="list-style-type: none"> • Data di manutenzione/sostituzione • Soggetto manutentore • Tipologia di intervento

Fig.12 - Norma UNI 11337-4: 2017, esempio dei livelli di approfondimento (LOD) per una parete prefabbricata (Credits: da www.shelidon.it)

4. Nel lessico del software, per "Famiglia" si intende un gruppo di elementi accomunati da un insieme di proprietà denominate parametri e da una rappresentazione grafica associata (Pozzoli, 2018).

Rispetto alla classificazione della norma UNI, e valutate le finalità della modellazione, si è deciso di sviluppare le famiglie di pannelli con un livello di sviluppo dei dati corrispondente al **LOD C: oggetto definito**. Il modello 3D dell'oggetto è perciò un solido strutturato, la cui dimensione e morfologia corrispondono all'oggetto reale. Sono state però operate delle semplificazioni rispetto alla stratigrafia del pannello, individuando le sole interfacce di separazione tra materiali diversi; tale scelta è stata resa necessaria a fronte di alcuni limiti riscontrati nelle fasi di modellazione degli elementi in cartone, in particolare i tubolari e fogli esterni formati dal cartone ripiegato su se stesso, la cui geometria risultava eccessivamente complessa e vincolata per essere correttamente supportata e parametrizzata all'interno del software.

Stabilite le condizioni a monte, la successiva modellazione della Famiglia caricabile è stata sviluppata a partire da un "Modello di famiglia"⁵ di "Modello generico metrico". La scelta del tipo di modello da impiegare ha previsto una fase di valutazione e comparazione di una serie di alternative. Difatti, dal punto di vista strutturale e costruttivo, i pannelli possono essere assimilati a murature portanti continue; tuttavia, il modello "Muro", così come concepito e modellato dal software, non consente di gestire la complessità geometrica della stratigrafia interna al pannello e in corrispondenza dei giunti, dove si ha la ripiegatura dei fogli esterni. Per questo motivo, e preso atto di una serie di limiti operativi riscontrati con l'approccio gestionale del software⁶, il modello utilizzato come base per digitalizzare i pannelli è stato un Modello generico metrico, ovvero un modello che rappresenta genericamente una "massa" senza darne alcuna informazione specifica rispetto alla tipologia di elemento costruttivo o alla sua funzione nel sistema edificio.

La digitalizzazione vera e propria ha previsto lo sviluppo del modello 3D del pannello in forma parametrica, andando ad inserire e relazionare progressivamente i parametri descritti in precedenza. La Fig.13 esemplifica la struttura a cascata secondo cui sono stati sviluppati i modelli digitali dei componenti prefabbricati. Per quanto attiene alla modellazione volumetrica, sono state sviluppate le tre tipologie-base di pannello, ovvero: (a) pannelli verticali semplici, (b) pannelli verticali sagomati per i fronti con copertura inclinata e (c) pannelli orizzontali per i solai (Figg.14,15). I pannelli sono stati modellati a partire dall'estruzione del profilo parametrizzato in pianta degli elementi in cartone (tubolari e fogli esterni), e successivamente sono stati completati con gli eventuali fori per l'inserimento degli infissi⁷, gli elementi lignei di completamento, ovvero montanti laterali e tavole di chiusura inferiore e superiore, e con le parti interne di isolamento termico. Infine, la modellazione ha previsto la descrizione delle librerie dei materiali, implementabile e ampliabile in futuro, che sono state elaborate a partire dalle schede tecniche di prodotto fornite dall'azienda. I materiali descritti sono stati assegnati alle modellazioni parametriche dei pannelli.

Per quanto attiene invece ai parametri di produzione, le formule contenute all'interno del modello restituiscono un'informazione di tipo quantitativo, sulla base degli input immessi dall'utente e/o letti dal modello, senza apportare modifiche alla visualizzazione tridimensio-

5. Per "Modello di famiglia" si intende un file con estensione .rft che fornisce la base per avviare la modellazione di un nuovo elemento. Il modello definisce la famiglia di appartenenza dell'elemento che si sta creando, e contiene le informazioni necessarie a "comunicare" al software la sua tipologia (modello di muro, pavimento, infisso, ecc.), quali sono i vincoli per il suo posizionamento e le sue relazioni con le altre famiglie all'interno del progetto.

6. Nonostante la modellazione informatizzata dei progetti rappresenti ormai un imperativo per la gestione dei processi edilizi, dall'esperienza sviluppata nelle fasi di digitalizzazione si è visto come gli strumenti che abilitano questo tipo di approccio siano in realtà ancora legati ad una concezione tradizionale del costruire. Nel caso specifico, non è stato possibile all'interno del software rintracciare un modello di famiglia che sintetizzasse le caratteristiche principali dell'elemento da modellare, ovvero un pannello *morfologicamente e tecnologicamente prefabbricato* ma che assolve alla *funzione* strutturale di "muro" portante. Addirittura, dallo studio di alcune casistiche similari, si è notato come spesso elementi costruttivi prefabbricati di un edificio devono essere modellati assimilandoli ad arredi, poiché tale modello risulta l'unico in grado di gestire una maggiore complessità degli elementi costruttivi. Tale limite non è solo di natura formale, ma esaurisce in parte le potenzialità dell'uso di software BIM negli aspetti che riguardano la gestione delle fasi di computo e verifica, integrazione con strumenti di simulazione, ecc.

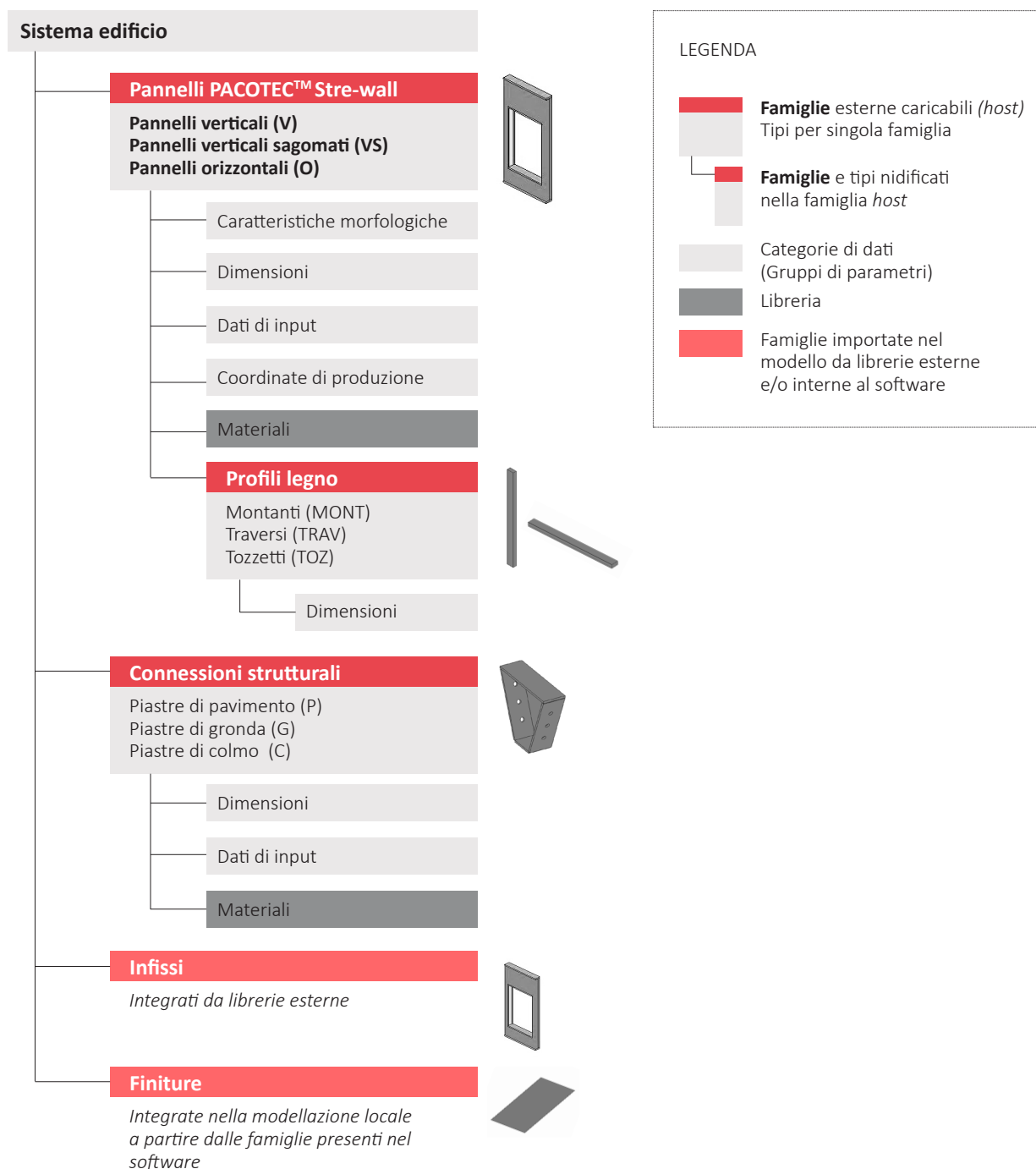


Fig.13 - Struttura dei dati contenuti all'interno del modello digitalizzato dei pannelli prefabbricati (Credits: Elaborazione personale)

7. La visibilità del foro per l'infisso è stata resa opzionale e attivabile attraverso un parametro di scelta del tipo "Si/No", selezionabile dall'utente, in modo da poter customizzare i pannelli a partire da un unico modello digitale.

nale del modello stesso.

Al fine di rendere omogenea la modellazione delle tre diverse famiglie, e soprattutto essere in grado in seguito di acquisire i dati negli abachi di progetto, tutti i parametri sono stati inseriti nei modelli come "Parametri condivisi", che vengono elencati in un file di testo esterno (.txt) e possono essere scambiati, importati e richiamati nei diversi dispositivi utilizzati per la modellazione.

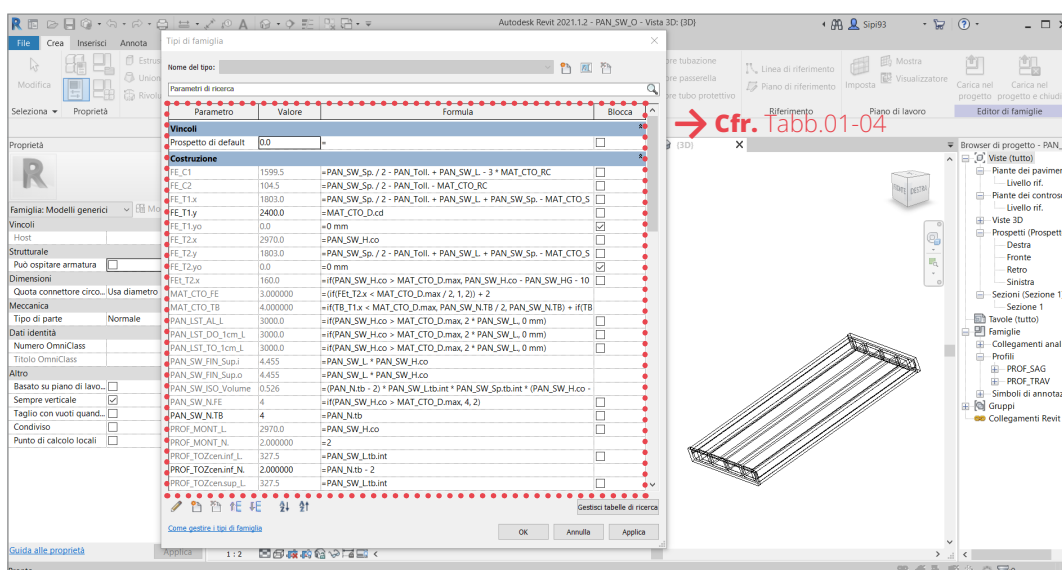
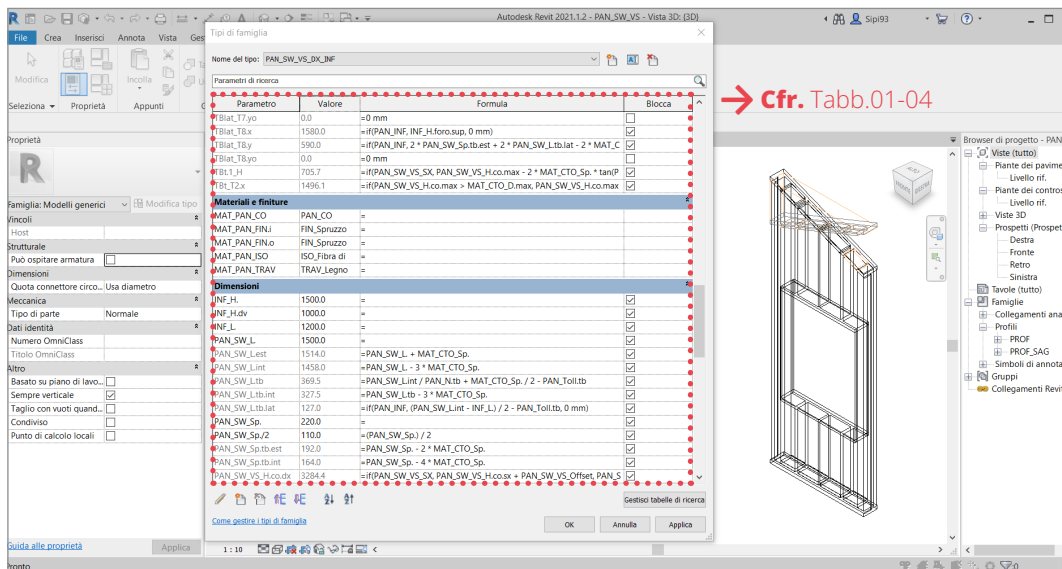
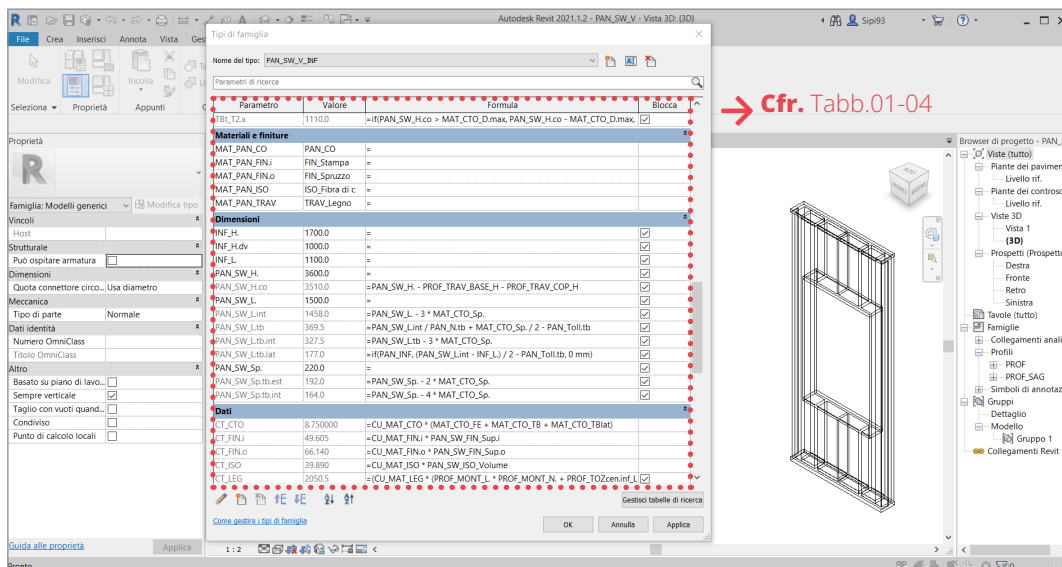


Fig.14 - Modellazione parametrica dei componenti del sistema costruttivo in Autodesk® Revit: modello geometrico tridimensionale ed estratto dell'elenco parametri inseriti (Credits: Elaborazione personale) (V. Appendici, "PAN_SW_V/S/O")

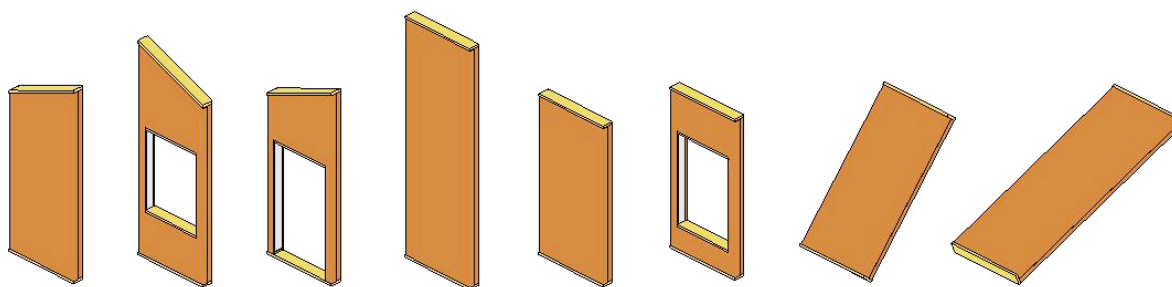


Fig.15 - Modello digitalizzato dei pannelli: la parametrizzazione consente di sviluppare configurazioni customizzate a partire da un'unica matrice di informazioni variando i parametri pre-impostati (Credits: Elaborazione personale)

→ Fase 03.b Creazione di un ambiente per la configurazione e gestione del progetto

Ha riguardato la predisposizione di un “Modello di progetto” in Autodesk® Revit, ovvero un file (.rvt) che può essere settato con una serie di impostazioni per quanto riguarda le viste, le unità di misura, le modalità di visualizzazione, gli abachi, ecc. Tale modello di progetto è stato inteso come lo strumento univoco da utilizzare per la configurazione delle aggregazioni dei pannelli in fase di progetto, oltre che per la gestione delle successive fasi di produzione. Difatti, all’interno del modello di progetto, oltre ad essere state impostate una serie di viste utili per velocizzare la preparazione della documentazione tecnica (planimetrie, piante, prospetti, sezioni), sono stati impostate una serie di tabelle che collezionano i dati importati dalle famiglie dei pannelli. Una volta caricati i pannelli nel modello di progetto, aggregati e personalizzati secondo le configurazioni scelte dal progetto, negli abachi è possibile andare a reperire una serie di informazioni inerenti al computo materiali (Abachi con prefisso “C/”) e la produzione dei pannelli (Abachi con prefisso “P/”). Nello specifico, le informazioni raccolte e ordinate dagli abachi si suddividono in:

→ **Abachi di computo (C/) per il *Quantity take-off***, ovvero la distinta e computo materiali, suddivisi in:

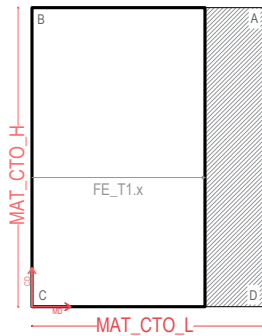
- **C/ CTO-FE, C/ CTO-TB (Tab.05):** Dimensioni dei pezzi di cartone da produrre: a monte di questo abaco sono riportate due colonne di parametri modificabili in cui è possibile andare a inserire manualmente le dimensioni dei fogli di cartone, e ulteriori due in cui impostare la direzione di inserimento del foglio in macchina. Rispetto ai valori inseriti, l’abaco restituisce il numero aggregato di fogli da utilizzare per produrre i pezzi (sub-componenti) per ciascun pannello, calcolando simultaneamente il costo totale del materiale.

Le formule che calcolano il quantitativo totale di fogli applicano un processo semplificato di nesting⁸ per ottimizzare i pezzi da produrre in un unico foglio, aggregandoli in progressione fino alla dimensione massima disponibile; al contrario, quando non è possibile utilizzare un unico foglio per ottenere due pezzi, la formula aggiunge automaticamente un +1 al totale dei fogli necessari. Il processo descritto è esemplificato dalla Fig.16, che mostra il processo di ottimizzazione del materiale per il caso di un pannello verticale semplice (PAN_SW_V).

8. Il termine *nesting* (annidare) viene utilizzato nell’industria manifatturiera per indicare una tecnica di organizzazione della produzione volta a ottimizzare l’uso delle materie prime, riducendo gli sprechi. A livello teorico, la tecnica consiste nel posizionare tutti gli elementi da realizzare su un’unica lastra (nel caso specifico, il foglio di cartone), incastrandoli tra di loro per ridurre lo sfido del taglio. Per la produzione di pezzi complessi e diversificati, ad oggi sono disponibili diversi software che le industrie possono utilizzare per virtualizzare e automatizzare tale processo di razionalizzazione del materiale.

Fogli esterni

I. PAN_SW_H.co < MAT_CTO_D.max (per DIR = MD, D.max = MAT_CTO_H)

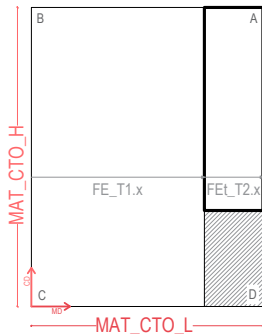


I. MAT_CTO_FE = 2 +

↓
Quantitativo di fogli di cartone necessari

↓
Condizioni progressive

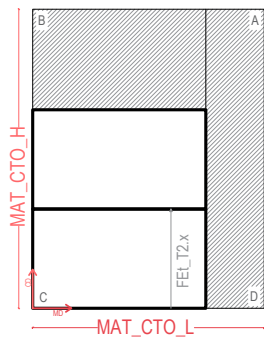
II. PAN_SW_H.co > MAT_CTO_D.max (per DIR = MD, D.max = MAT_CTO_H)



IIa. FE_tT1.x < MAT_CTO_D.max: condizione sempre vera
FE_tT2.x < MAT_CTO_L - FE_tT1.x

IIa. if(FE_tT2.x < MAT_CTO_L - FE_tT1.x), +0, II.b

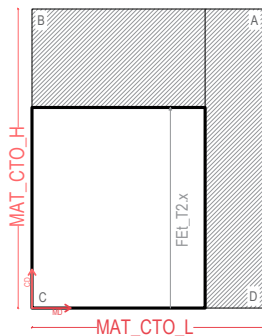
↓
Quantitativo di fogli di cartone necessari, a sommare dalla condizione I.



IIb. FE_tT2.x < (MAT_CTO_D.max/2)

IIb. if(FE_tT2.x < MAT_CTO_D.max/2), +1, II.c

↓
Quantitativo di fogli di cartone necessari, a sommare dalla condizione I.



IIc. FE_tT2.x > (MAT_CTO_D.max/2)

IIb. if(FE_tT2.x < MAT_CTO_D.max/2), +2

↓
Quantitativo di fogli di cartone necessari, a sommare dalla condizione I.

Formula finale (Cfr. Tab.01, pp.302-303):

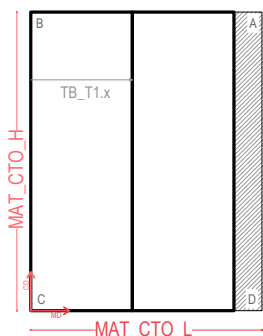
MAT_CTO_FE = (if(FE_tT2.x < MAT_CTO_D.max / 2, 1, 2)) + 2

Fig.16 - Esempificazione grafica del processo di ottimizzazione del materiale (*nesting*) e processo sviluppato per il calcolo del quantitativo di fogli di cartone necessari alla produzione. Nell'immagine: esempio di calcolo dei fogli esterni e dei fogli per i tubolari di un pannello verticale semplice (PAN_SW_V) (Credits: Elaborazione personale) (V. Appendici, "PRM_PRJ")

Fogli per tubolari interni

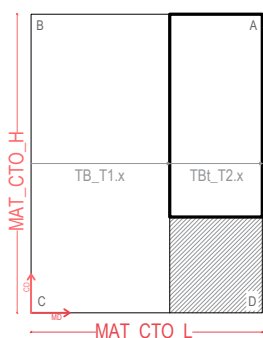
I. PAN_SW_H.co < MAT_CTO_D.max (per DIR = MD, D.max = MAT_CTO_H)

Ia. TB_T1.x < MAT_CTO_D.max/2



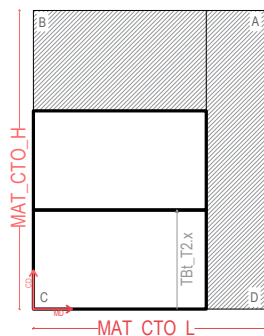
Ia. $MAT_CTO_TB = \text{if}(TB_T1.x < MAT_CTO_D.max/2),$
PAN_SW_N.TB/2, PAN_SW_N.TB +

II. PAN_SW_H.co > MAT_CTO_D.max (per DIR = MD, D.max = MAT_CTO_H)



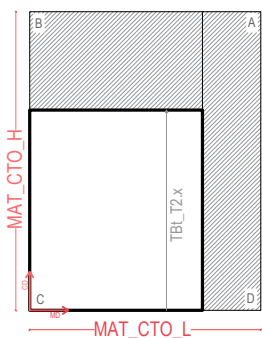
IIa. FEt_T1.x < MAT_CTO_D.max: condizione sempre vera
 FEt_T2.x < MAT_CTO_L - FE_T1.x

IIa. $\text{if}(TBt_T2.x < MAT_CTO_L - TB_T1.x), +0, II.b$



IIb. TBt_T2.x < (MAT_CTO_D.max/2)

IIb. $\text{if}(TBt_T2.x < MAT_CTO_D.max/2), + PAN_SW_N.TB/2, II.c$



IIc. TBt_T2.x > (MAT_CTO_D.max/2)

IIc. $\text{if}(TBt_T2.x > MAT_CTO_D.max/2), + PAN_SW_N.TB$

Formula finale (Cfr. Tab.01, pp.302-303):

MAT_CTO_TB = if(TB_T1.x < MAT_CTO_D.max,
PAN_SW_N.TB/2, PAN_SW_N.TB) + if(TBt_T2.x <
MAT_CTO_D.max/2, PAN_SW_N.TB/2, PAN_SW_N.TB)

Seguendo la medesima logica, in fase di parametrizzazione dei dati (Fase O3.a) sono state descritte le formule per il calcolo del quantitativo di fogli necessari per le diverse tipologie di pannello (verticale, verticale sagomato e orizzontale), suddivise in fogli per la produzione dei tubolari, dei tubolari laterali⁹ e dei fogli esterni (Cfr. righe evidenziate nella Tab.01, pp.288-289). Utilizzando l'abaco pre-impostato, gli operatori hanno a disposizione un'unica *console* da cui verificare e razionalizzare il materiale, utilizzabile come strumento decisionale per ottimizzare gli ordini del materiale rispetto alla combinazione di numero di fogli-dimensioni che maggiormente ottimizza il consumo di materiale. Una volta decisa la combinazione desiderata, il materiale può quindi essere ordinato sulla base delle macro-categorie omogenee di dimensioni (per esempio, "n1" fogli 1085x3100 mm, "n2" fogli 1085x500 mm, ecc.);

- **C/ PAN_SW** (Tab.06): Abaco delle tipologie di pannelli;
- **C/ FIN** (Tab.07): Finiture esterne e interne;
- **C/ GNT** (Tab.08): Giunti di separazione (per pannelli con altezza superiore a 3080 mm);
- **C/ ISO** (Tab.09): Materiale isolante insufflato all'interno dei tubolari;
- **C/ PROF_LEG** (Tab.10): Profili in legno di completamento dei pannelli;
- **C/ PSTR** (Tab.11): Quantità e tipologia di piastre e minuteria per gli ancoraggi.

Tab.05 - Struttura degli abachi di computo C/ CTO-FE, C/ CTO-TB: Dimensioni dei pezzi di cartone da produrre

	Tipologia di pannello	Quantità presenti nel progetto	Dimensioni foglio di cartone	Direzione inserimento foglio in macchina	Altezza giunto di separazione (per H > 3080 mm)	Dimensione pezzi
Informazioni raccolte dall'abaco	Famiglia e tipo	Numero	Dimensioni nelle direzioni MD/CD (mm)	Spunta direzione MD/CD	Altezza (mm)	Larghezza Altezza (mm)
<i>Continua</i>		Quantità di pezzi	Numero aggregato e ottimizzato di fogli di cartone	Costo unitario foglio di cartone	Costo totale cartone	Superficie totale di cartone
	Informazioni raccolte dall'abaco	Numero	Famiglia e tipo	Costo (€/foglio)	Costo totale (€)	Superficie (m2)

Tab.06 - Struttura dell'abaco di computo C/ PAN_SW: Tipologie di pannelli presenti nel progetto

	Tipologia di pannello	Quantità presenti nel progetto	Dimensioni pannello			Infisso
Informazioni raccolte dall'abaco	Famiglia e tipo	Numero	Larghezza (mm)	Altezza (mm)	Altezze parziali tubolari (solo per pannelli verticali sagomati) (mm)	Spunta per inserimento infisso

9. Utilizzati nei pannelli verticali che prevedono l'integrazione di infissi.

Tab.07 - Struttura dell'abaco di computo C/ FIN: Computo delle finiture esterne e interne

	Tipologia di pannello	Quantità presenti nel progetto	Tipologia di finitura esterna e interna	Quantità delle finiture esterne e interne	Costo unitario della finitura	Costo totale finiture
Informazioni raccolte dall'abaco	Famiglia e tipo	Numero	Selezione da libreria materiali	Superficie totale (m ²)	Costo (€/m ²)	Costo totale (€)

Tab.08 - Struttura dell'abaco di computo C/ GNT: Computo dei giunti di separazione

	Tipologia di pannello	Quantità presenti nel progetto	Materiale del giunto di separazione	Quantità
Informazioni raccolte dall'abaco	Famiglia e tipo	Numero	Selezione da libreria materiali	Lunghezza totale dei giunti (m)

Tab.09 - Struttura dell'abaco di computo C/ ISO: Computo del materiale isolante insufflato

	Tipologia di pannello	Quantità presenti nel progetto	Materiale isolante	Quantità	Costo unitario materiale isolante	Costo totale materiale isolante
Informazioni raccolte dall'abaco	Famiglia e tipo	Numero	Selezione da libreria materiali	Volume totale dell'insufflaggio (m ³)	Costo (€/m ³)	Costo totale (€)

Tab.10 - Struttura dell'abaco di computo C/ PROF_LEG: Distinta dei profili in legno

	Tipologia di pannello	Quantità presenti nel progetto	Tipologia e quantità di profili in legno		
Informazioni raccolte dall'abaco	Famiglia e tipo	Numero	Sezione (mm)	Lunghezza (mm)	Quantità (numero)

Tab.11 - Struttura dell'abaco di computo C/ PSTR: Distinta delle piastre di ancoraggio in acciaio

	Tipologia di piastra di ancoraggio	Quantità presenti nel progetto	Dimensioni	Accessori e minuteria	Quantità accessori e minuteria	Costo totale ancoraggi
Informazioni raccolte dall'abaco	Famiglia e tipo	Numero	Angolo di inclinazione Base Altezza Diametro fori Passo fori (mm)	Tipologia	Quantità	Costo totale piastre ancoraggio (€)

→ **Abachi di produzione (P/)** (P/ T_FE, P/ T_TB, P/ C_FE, P/ C_TB) (Tab.12)

Gli abachi raccolgono gli input per la lavorazione, ordinando i parametri/coordinate che devono essere immessi nel macchinario di taglio e cordonatura per avviare la produzione. Seguendo la struttura dell'algoritmo di controllo della macchina, che prevede anche sequenze iterative per le lavorazioni simili, a capo dell'elenco di coordinate viene riportato il numero di volte (valore "R" dell'algoritmo) per le quali è necessario ripetere la stessa operazione prima di "uscire" dalla lavorazione¹⁰.

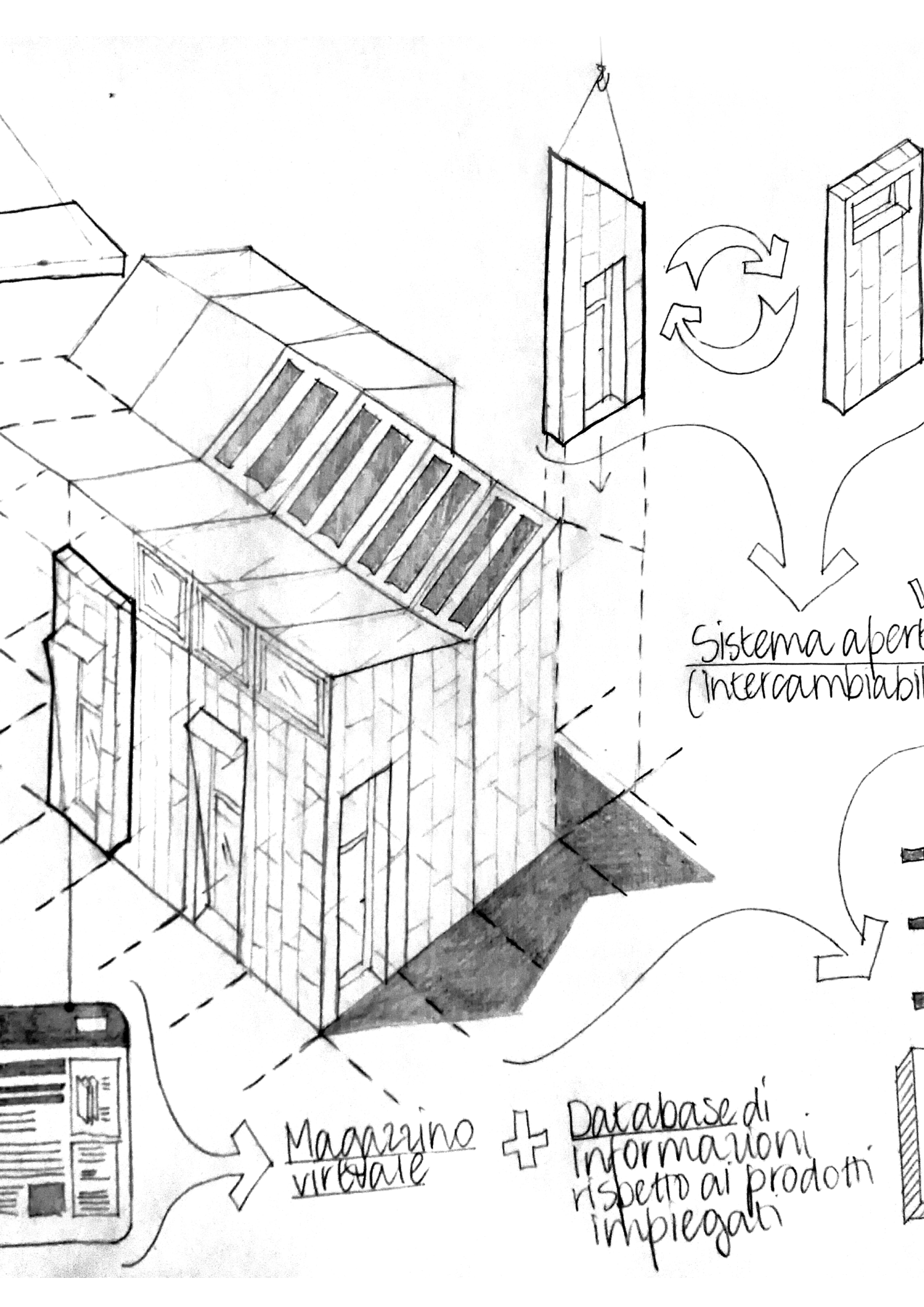
Tab.12 - Struttura degli abachi di produzione (P/ T_FE, P/ T_TB, P/ C_FE, P/ C_TB): Input per la lavorazione dei fogli di cartone

	Tipologia di pannello	Quantità presenti nel progetto	Direzione inserimento foglio in macchina	Coordinate di lavorazione
Informazioni raccolte dall'abaco	Famiglia e tipo	Numero	Spunta direzione MD/CD	Coordinate progressive di taglio o cordonatura (mm), ordinate secondo gli scenari di lavorazione (Fig.10a/b) e le fasi individuate dall'algoritmo di controllo del macchinario (Fig.11)

Rispetto alla predisposizione degli abachi, uno dei maggiori limiti e difficoltà si è riscontrato nell'impossibilità di sfruttarne appieno le potenzialità di interrogazione, classificazione e combinazione dei dati, portando ad utilizzarli per la sola "elencazione" di dati che sono stati precedentemente immessi manualmente all'interno delle famiglie. Questo è avvenuto in conseguenza della necessità/vincolo di utilizzare un modello generico come base di partenza per la modellazione della famiglia. A causa di questa impostazione, i pannelli digitalizzati, una volta caricati nel modello di progetto, vengono letti come masse costituite da un elemento unico, privo di una specificità costruttiva (come accade invece se si inserisce, per esempio, un muro o un pilastro). Di conseguenza, il software non è in grado di leggere e separare i singoli elementi costitutivi in maniera automatica a partire dalla modellazione tridimensionale, leggendo automaticamente informazioni come il volume di materiale isolante, la lunghezza delle tavole di legno, ecc. Tali informazioni sono state quindi immesse manualmente nella famiglia come parametri, descrivendo una formula che ne calcola le quantità a partire dai valori dimensionali leggibili sul modello (altezza, larghezza, spessore del pannello). Per riprendere le due casistiche citate, la quantità di isolante è stata calcolata con una formula che richiama i dati di larghezza, spessore e altezza dei tubolari interni; la lunghezza delle tavole di legno è invece associata alle dimensioni del pannello stesso, in particolare alla larghezza (per le tavole di chiusura inferiori e superiori) e all'altezza (nel caso dei montanti interni).

Una volta messi a punto gli strumenti digitalizzati, la fase successiva è consistita nell'utilizzo dei modelli BIM all'interno del processo di progettazione di un caso-studio, ovvero il modello di unità scolastica **CARES**, in modo da poter compiutamente rendere operative le proposte e verificarne l'efficacia nell'ottimizzazione del processo progettuale e produttivo dei pannelli.

10. Il termine di una lavorazione corrisponde all'uscita da una sequenza dell'algoritmo, ovvero quando la lavorazione "i"esima > R



Sistema aperto
(Intercambiabile)

Magazzino
virtuale



Database di
informazioni
rispetto ai prodotti
impiegati

III.2 Test del processo sperimentale nella prototipazione digitale di una unità scolastica emergenziale: il progetto CARES

2.1. Un caso-studio per testare l'innovazione di prodotto-processo: proposta per un modello di unità scolastica emergenziale

Il modello di processo riprogettato è stato implementato e testato contestualmente allo sviluppo di una proposta progettuale per una unità scolastica emergenziale (Fase 04), con l'obiettivo di definire un modello innovativo e sostenibile di infrastruttura per l'educazione, scalabile e replicabile, da impiegare per la gestione di contingenze transitorie di breve-medio periodo. Il caso-studio dell'unità scolastica è stato interpretato sia come un contesto di applicazione rispetto al quale verificare il raggiungimento degli obiettivi, sia come proposta di un modello di innovazione di prodotto nel campo delle soluzioni tecnologiche utilizzabili per la realizzazione di manufatti scolastici emergenziali. Lo sviluppo del progetto ha infatti permesso di rispondere implicitamente all'obiettivo di definire un modello innovativo di infrastruttura per l'educazione; il carattere di innovazione è da leggersi non solo rispetto al manufatto, ma anche in relazione al processo edilizio che ne supporta lo sviluppo in accordo ai principi della qualità, sfruttamento razionale delle risorse e sostenibilità.

Dal punto di vista metodologico, lo sviluppo della proposta di progetto ha seguito una strategia di tipo *research-by-design*, informata da un approccio di tipo esigenziale-prestazionale, sviluppata nelle seguenti fasi di progressivo approfondimento (Fig.18):

→ **Fase 04.a** Test e verifica del modello di processo, sviluppati in una serie di step intermedi, ovvero:

- **Scelta della destinazione funzionale dell'unità CARES:** inizialmente, sono state valutate una serie di alternative rispetto alla tipologia di spazio da progettare, esplorando la possibilità di sviluppare uno spazio didattico, un luogo per apprendimento informale, oppure uno spazio da adibire a funzioni collettive come una biblioteca. La direzione finale è stata quella di implementare un modello di spazio didattico da destinare ad attività di apprendimento di classe, comunque flessibile e rifunzionalizzabile a seconda del programma educativo, valutando che tale casistica risulta tra quelle maggiormente ricorrenti nella gestione di contingenze emergenziali¹;
- **Descrizione del quadro esigenziale-normativo e individuazione degli strumenti di verifica:** la definizione dei requisiti di progetto è stata sviluppata con riferimento agli esiti delle analisi preliminari e, in particolare, rispetto al quadro di esigenze sintetizzato nella **Pt. II, Cap. 2.8**. Tali requisiti sono stati completati dai vincoli e/o indirizzi contenuti nella normativa nazionale, tra cui quelli per la progettazione degli spazi scolastici (D.M. 18 dicembre 1975), quelli richiamati dalle Linee Guida Ministeriali (2013) sull'edilizia scolastica innovativa, e il Decreto CAM per i nuovi interventi di edilizia pubblica. Al quadro esigenziale è stata affiancata l'individuazione delle verifiche di conformità e di prestazione che sono già state sviluppate da AREA S.r.l. rispetto alla tecnologia di pannelli prefabbricati.

cati, così come quelle che l'azienda ha previsto di sviluppare in previsione della futura installazione dell'unità scolastica **CARES**. Rispetto all'insieme di verifiche da produrre per assicurare la conformità dell'intervento, e considerando la completa implementazione del modello digitalizzato in BIM per gli aspetti di simulazione e verifica, si è deciso di analizzare e suggerire i possibili strumenti (software e *plug-in*) che potranno essere integrati con il software per sviluppare le simulazioni di tipo strutturale, ambientale (LCA), energetico ed acustico;

- **Esplorazione delle alternative di progetto e progettazione dell'unità:** le famiglie BIM dei pannelli e l'ambiente di configurazione sviluppati in precedenza sono stati utilizzati e testati per la progettazione di un primo modello di unità scolastica **CARES**. Lo spazio-tipo è stato sviluppato rispetto ad un caso applicativo reale, ovvero l'ampliamento della **Scuola Primaria "Jean Piaget" di Altarello (Riposto, Catania)**. La scuola necessita infatti di uno spazio aggiuntivo in cui accogliere gli studenti, che attualmente – a causa di una mancanza di aule – seguono le lezioni secondo una turnazione oraria delle aule. Il poter disporre di un contesto reale rispetto al quale elaborare l'iter di progetto/produzione è risultato un elemento fondamentale per garantire l'affidabilità dei risultati, ferma restando la possibilità di trasferire la soluzione, adattandola secondo le prescrizioni di legge e le specificità locali, ad altri contesti applicativi. Il progetto è stato sviluppato in collaborazione con l'azienda AREA S.r.l.; in particolare, ai professionisti aziendali sono stati forniti ed è stato chiesto di utilizzare gli strumenti BIM – le famiglie di componenti costruttivi e il modello di progetto – per elaborare i diversi aspetti della proposta progettuale: valutazione e confronto delle opzioni, preparazione della documentazione tecnica, ecc. L'utilizzazione da parte degli esperti aziendali ha permesso di testare la funzionalità e la semplicità di uso dei nuovi strumenti da parte di un "utente-tipo", dai quali progressivamente sono stati acquisiti *feedback* per correggere e affinare gli strumenti sviluppati. Il progetto architettonico-spaziale dell'unità **CARES** ha integrato gli input del quadro conoscitivo analizzato nella prima parte della ricerca, e le soluzioni progettuali sono state via via valutate rispetto alla loro rispondenza al quadro esigenziale, che ha rappresentato il riferimento rispetto a cui controllare e selezionare le alternative;

Fig.17 (prima pagina) - Concept di prodotto-processo dell'unità scolastica CARES (Credits: Elaborazione personale)



Fig.18 - Fase 04- Test e verifica del modello di processo attraverso il caso-studio dell'unità scolastica CARES: fasi e attività (Credits: Elaborazione personale)

1. Tale riflessione scaturisce anche da un periodo, quello emergenziale legato alla pandemia da Covid-19, in cui gran parte delle strutture scolastiche nazionali ha dovuto ridurre la capienza delle aule, manifestando la necessità di ampliamento degli spazi per garantire lo svolgimento delle attività didattiche di classe.

→ Fase 04.b Ottimizzazione del consumo di materiale tramite il modello BIM

Ha riguardato l'estrapolazione dei dati inerenti al consumo di materiale, ovvero la verifica rispetto all'ottimizzazione delle risorse materiale e alla riduzione degli sprechi confrontando una serie di opzioni - opzioni per il tipo di fogli da utilizzare nella produzione dell'unità **CARES** (numero e dimensione dei fogli di cartone). Si è quindi effettuata una comparazione tra una soluzione ottimizzata attraverso l'abaco dei fogli di cartone predisposto in Autodesk® Revit e la quantità di materiale che sarebbe consumato ordinando fogli di cartone di dimensione omogenea 2400x3100 mm, ovvero la tipologia che viene attualmente acquistata e stoccata nel magazzino dall'azienda;

→ Fase 04.c Intervista finale con gli operatori aziendali

Confronto con i diretti utilizzatori degli strumenti BIM durante lo sviluppo del progetto dell'unità **CARES**, finalizzata ad acquisire una serie di *feedback* in merito agli aspetti di efficientamento qualitativo, all'utilizzabilità e funzionalità degli strumenti, alle implicazioni operative sottese all'adozione del nuovo flusso di lavoro, nonché alle criticità e limiti da superare nelle fasi successive.

2.2. Quadro esigenziale e strumenti di verifica BIM-based

La definizione del quadro di esigenze a cui rispondere ha rappresentato il primo passaggio da sviluppare per approfondire e sistematizzare l'insieme di input provenienti dalle fasi istruttorie e analitiche di ricerca, nonché dall'esperienza diretta sul campo. Il quadro esigenziale è stato elaborato, in forma tabellare e sintetica, sulla base della classificazione e scomposizione del sistema edilizio proposta dalle norme UNI:

- **UNI 8289:1981** *Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione.*
- **UNI 8290-2:1983** *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi dei requisiti.*
- **UNI 11277:2008** *Sostenibilità in edilizia. Esigenze e requisiti di eco-compatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di nuova edificazione e ristrutturazione.*

Al fine di produrre un insieme esaustivo di requisiti e vincoli che guidassero le successive fasi di progettazione dell'unità scolastica, il quadro esigenziale è stato completato dai riferimenti legislativi. Questi sono stati rintracciati tra quelli che normano, da un lato, la progettazione degli aspetti spaziali, funzionali, tecnologici e ambientali degli edifici scolastici, e dall'altro i requisiti da rispettare per degli interventi di edilizia pubblica più in generale, con particolare riferimento a quelli che riguardano la sostenibilità ambientale degli edifici (Decreto CAM). A questi sono stati affiancati i necessari riferimenti normativi da acquisire in virtù della natura prefabbricata dei pannelli e della loro necessità di trasporto, e nello specifico quelli del Codice della Strada. In sintesi, le normative che sono state assunte a riferimento sono le seguenti:

- **D.M. 11 aprile 2013**, *Norme tecniche-quadro, contenenti gli indici minimi e massimi di funzionalità urbanistica, edilizia, anche con riferimento alle tecnologie in materia di efficienza e risparmio energetico e produzione da fonti energetiche rinnovabili, e didattica indispensabili a garantire indirizzi progettuali di riferimento adeguati e omogenei sul territorio nazionale;*
- **D.M. 18 dicembre 1975**, *Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica;*
- **D.M. 26 agosto 1992**, *Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica;*
- **D.M. 14 giugno 1989 n.236**, *Prescrizioni tecniche necessarie a garantire l'accessibilità, l'adattabilità e la visitabilità degli edifici privati e di edilizia residenziale pubblica, ai fini del superamento e dell'eliminazione delle barriere architettoniche;*
- **D.Lgs. 3 marzo 2011 n.28**, *Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE;*
- **D.M. 26 giugno 2015**, *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici;*

- **D.M. 11 ottobre 2017**, *Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*;
- **D.M. 14 gennaio 2008**, *Norme tecniche sulle Costruzioni*;
- **D.Lgs. 30 aprile 1992 n.285**, *Nuovo Codice della Strada*.

Una volta messo a punto il quadro esigenziale e normativo, l'elenco dei requisiti e vincoli è stato implementato in funzione delle verifiche da produrre in previsione della futura realizzazione dell'intervento presso la Scuola "J. Piaget" di Altarello (CT). Con l'obiettivo di attuare un processo di progettazione collaborativo che integrasse gli strumenti da utilizzare per le verifiche, è stata inizialmente esplorata la possibilità di utilizzare il modello digitalizzato in BIM per produrre le simulazioni, elaborati e documenti richiesti. Analizzando la letteratura scientifica di riferimento sul tema di integrazione tra BIM e Building Simulation Modelling (BSM), è emersa l'esistenza di un dibattito aperto sulle attuali possibilità di trasferire tutti i contenuti informativi di un progetto all'interno di un cosiddetto *digital twin*, un clone digitale di un edificio da cui partire per simulare e verificare tutti i diversi aspetti di prestazione. Il maggiore limite all'implementazione di questo tipo di approccio si riscontra nel fatto che i modelli digitali BIM ad elevata complessità, che risultano particolarmente utili per la gestione architettonico-costruttiva del progetto, rischiano di essere controproducenti o addirittura non interpretabili dai software usati, per esempio, per le verifiche strutturali, acustiche ed energetiche (Alwan *et al.*, n.d.; Asl *et al.*, 2014; Farzaneh *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2019; Ramaji *et al.*, 2020; Sacks *et al.*, 2020). Operativamente, l'utilizzabilità del modello BIM per lo sviluppo delle simulazioni risulta condizionata ad una serie di aggiustamenti (integrazioni o semplificazioni) che devono essere effettuati sul modello di partenza, estrapolando progressivamente le informazioni necessarie alla simulazione che si intende eseguire. Non potendo in questa prima fase della ricerca sviluppare esaustivamente il percorso di integrazione tra il modello BIM e gli strumenti simulativi, si è deciso di affiancare al quadro analitico una ricognizione preliminare dei software² e/o *plug-in* che potranno successivamente essere utilizzati per le verifiche prestazionali; gli strumenti sono stati rintracciati attraverso indagine bibliografica e sitografica di casi applicativi, e sono stati selezionati tra quelli che maggiormente assicurano la compatibilità con il modello digitalizzato in Autodesk® Revit (Tab.13, colonna (e)). Tale operazione risulta propedeutica ad accertare che il modello BIM possa effettivamente alimentare le simulazioni e test necessari a verificare la conformità del progetto, in particolare per quanto riguarda le analisi strutturali, quelle di comfort indoor (illuminazione, acustica), di efficienza energetica e di impatto ambientale LCA. In questo modo è possibile prefigurare la fattibilità di implementare il modello di processo sviluppato nella sua interezza, così come descritto dal *workflow* della **Pt. III, Cap. 1.3, Fig.7**.

Il quadro finale elaborato è quello sintetizzato nella Tabella 13, che mette a sistema ed evidenzia:

2. L'utilizzabilità del modello con altri software è subordinata all'utilizzo di opportuni formati file di interscambio. In ambito di modellazione BIM, il principale formato utilizzato per il trasferimento dati è l'IFC (Industry Foundation Classes), un formato dati neutro non proprietario e standardizzato (ISO 16739-1:2018) sviluppato dall'organizzazione internazionale buildingSMART per favorire lo scambio di informazioni all'interno dei processi edilizi basati sull'uso del BIM (BuildingSMART Italia, n.d.).

- Il quadro esigenziale per il progetto, ovvero i requisiti alla scala tecnologica del componente, alla scala tecnologica del modulo scolastico e alla scala ambientale (Tab.13, colonna (b));
- I riferimenti normativi nazionali per la progettazione di spazi scolastici emergenziali (Tab.13, colonna (c));
- Le verifiche che possono essere sviluppate a partire dal modello digitalizzato in BIM e quelle – attinenti alle prestazioni del pannello prefabbricato in cartone – già acquisite dall’azienda internamente, attraverso simulazioni o prove dirette in laboratorio (Tab.13, colonna (d));
- Gli strumenti che, nelle fasi successive della ricerca, potranno essere integrati con il modello BIM per sviluppare le simulazioni e verifiche prestazionali (strutturali, acustiche, comfort indoor, efficienza energetica, LCA) (Tab.13, colonna (e)).

Tab.13 - Quadro esigenziale (a, b) e normativa di riferimento (c) per il progetto dell’unità CARES.
Verifiche sviluppate e/o già acquisite (d) e strumenti BIM suggeriti per la successiva implementazione del modello (e)

		Requisiti (b)		
		Sistema tecnologico Scala di componente	Sistema tecnologico Scala di edificio	Sistema ambientale
Classi di esigenze (a)	SICUREZZA	---	Resistenza meccanica delle strutture Dimensionamento degli elementi tecnici in modo da resistere alle azioni statiche e dinamiche	---
		---	Portanza del supporto di fondazione Dimensionamento degli elementi tecnici di fondazione in modo da supportare il carico del manufatto anche in relazione alla tipologia di terreno	---
		Resistenza al fuoco Capacità degli elementi tecnici di non subire per un determinato periodo di tempo mutamenti della resistenza meccanica, a non emettere sostanze nocive e a non contribuire alla diffusione di incendio	---	Possibilità di evacuazione Capacità dello spazio di facilitare le operazioni di allontanamento e/o riparo in attesa dei soccorsi in modo sicuro
		---	Tenuta all’acqua e alla neve Adeguate progettazione dei nodi tecnico-costruttivi al fine di evitare l’ingresso di acqua, anche proveniente da accumuli di neve	---
BENESSERE, IGIENE E SALUTE DELL’UTENTE	---	Controllo del flusso luminoso Integrazione di elementi tecnici e accorgimenti progettuali capaci di modulare l’ingresso della luce naturale dal suo valore massimo fino all’oscurità	Controllo del flusso luminoso Progettazione degli spazi per garantire un’adeguata condizione di comfort illuminotecnico sul piano di lavoro, evitando fenomeni di abbagliamento	
	---	Controllo dell’irraggiamento solare Integrazione di sistemi di schermatura per modulare l’ingresso di energia termica raggiante secondo le diverse stagioni dell’anno	Controllo dell’irraggiamento solare Modulazione dell’ingresso di energia termica raggiante attraverso un’adeguata progettazione degli spazi secondo l’orientamento solare	
	---	---	Illuminazione artificiale Progettazione e integrazione di sistemi di illuminazione artificiale modulabili anche in relazione alla tipologia di attività svolta	

Continua da pagina precedente

	Normativa di riferimento (c)	Verifiche sviluppate dal modello BIM o già acquisite dal produttore (d)	Strumenti di verifica da implementare per le verifiche successive (e)
	<p>D.M. 14 gennaio 2008, Norme Tecniche sulle Costruzioni Stabilisce i requisiti e metodologie di calcolo per la verifica dei requisiti di sicurezza strutturale e antisismica</p>	<p>Verifica sviluppata consulenti esterni</p> <p>Prove di laboratorio</p>	<p>Autodesk® Robot (Nawari, 2012; Nawari <i>et al.</i>, 2014; Ren <i>et al.</i>, 2018)</p> <p>IperSpace BIM Midas GEN³ (Rudella, 2018)</p>
	<p>D.M. 26 agosto 1992, Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica Stabilisce i requisiti prestazionali per i componenti di chiusura e partizioni Individua le misure per la compartimentazione degli spazi e la progettazione delle vie di esodo</p>	<p>Prove di laboratorio</p>	<p>---</p>
	<p>---</p>	<p>Autodesk® Revit</p>	<p>---</p>
	<p>D.M. 11 ottobre 2017, Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici Stabilisce un livello minimo di illuminazione naturale all'interno degli ambienti corrispondente ad un Fattore Medio di Luce Diurna > 2%</p>	<p>---</p>	<p>IES Virtual Environment⁴</p>
	<p>D.M. 11 ottobre 2017, Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici Viene stabilita la coerenza dell'integrazione di sistemi di schermatura solare</p>	<p>---</p>	<p>IES Virtual Environment</p>
	<p>---</p>	<p>---</p>	<p>IES Virtual Environment</p>

3. I software IperSpace-BIM e Midas GEN sono stati selezionati perché consentono di verificare la struttura portante attuale dei pannelli, che è rappresentata da un telaio leggero di montanti e traversi in legno, assimilabile ad una struttura a *platform-frame*.

4. IES Virtual Environment (IES VE) è una *suite* di strumenti, interoperabili con i software di gestione BIM, utilizzabili per la simulazione e analisi integrata delle prestazioni energetico-ambientali degli edifici lungo il loro ciclo di vita (<https://www.iesve.com/>).

Continua da pagina precedente

BENESSERE, IGIENE E SALUTE DELL'UTENTE	Isolamento termico Progettazione dei componenti di involucro per assicurare un'opportuna resistenza al passaggio di calore in funzione delle condizioni climatiche	---	---
	Controllo dell'inerzia termica Progettazione dei componenti di involucro per ritardare di una opportuna quantità di tempo l'effetto dei valori massimi e minimi dell'onda termica e ad attenuare l'ampiezza delle oscillazioni della temperatura	---	---
	Controllo della condensa Attitudine degli elementi tecnici a non generare fenomeni di condensa superficiale e/o inerziale	---	---
	---	Temperatura dell'aria interna Mantenimento della temperatura dell'aria interna entro opportuni livelli in funzione delle condizioni climatiche esterne previste	---
	---	---	Ventilazione naturale Possibilità di ottenere ricambio di aria per via naturale attraverso una corretta progettazione delle unità ambientali e delle aperture
	---	Ventilazione meccanica Possibilità di ottenere ricambio di aria attraverso sistemi attivi di ventilazione (VMC)	---
	Isolamento acustico Progettazione dei componenti di involucro per fornire un'adeguata resistenza al passaggio dei rumori	---	---
FRUIBILITÀ	---	---	Dimensione delle unità ambientali Attitudine delle unità ambientali a consentire, per forma e dimensioni, le attività a cui sono destinate
	---	---	Flessibilità spaziale Attitudine delle unità ambientali a subire facilmente modifiche, integrazioni o suddivisioni, anche nel corso della giornata scolastica e secondo le attività svolte
	---	---	Arredabilità Attitudine delle unità ambientali a consentire, per forma e dimensione, la predisposizione di molteplici setting funzionali nel corso della giornata scolastica e secondo le attività svolte

Continua da pagina precedente

<p>D.M. 26 giugno 2015, Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici Stabilisce i requisiti di prestazione energetica per gli edifici net-Zero Energy</p>	<p>Prove di laboratorio</p> <p>Simulazioni con software Grassopper 3D + Ladybug + Honeybee plug-ins</p>	<p>IES Virtual Environment</p>
<p>---</p>		
<p>---</p>		
<p>D.M. 11 ottobre 2017, Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici Prescrizione per rapporto aerante minimo di 1/8</p>	<p>Autodesk® Revit</p>	<p>---</p>
<p>D.M. 11 ottobre 2017, Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici Rimanda a specifiche norme UNI per il calcolo dei ricambi orari</p>	<p>---</p>	<p>IES Virtual Environment</p>
<p>D.M. 11 ottobre 2017, Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici Riferimento a norme UNI ISO per la progettazione e la verifica dei componenti dal punto di vista del comfort acustico</p>	<p>---</p>	<p>(Nik-Bakht <i>et al.</i>, 2021; Sušnik <i>et al.</i>, 2021; Wu & Clayton, 2013)⁵</p>
<p>D.M. 18 dicembre 1975, Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica Standard tecnico-progettuale da impiegare nella progettazione di interventi di edilizia scolastica Per lo spazio didattico per la scuola primaria è prescritta una superficie minima di 1.80 m2/alunno</p>	<p>Autodesk® Revit</p>	<p>---</p>
<p>D.M. 11 aprile 2013, Norme tecniche-quadro, contenenti gli indici minimi e massimi di funzionalità urbanistica, edilizia, anche con riferimento alle tecnologie in materia di efficienza e risparmio energetico e produzione da fonti energetiche rinnovabili, e didattica indispensabili a garantire indirizzi progettuali di riferimento adeguati e omogenei sul territorio nazionale Descrive gli indirizzi qualitativi per la progettazione degli spazi scolastici</p>	<p>---</p>	<p>---</p>
<p>---</p>	<p>---</p>	<p>---</p>

5. Rispetto all'integrazione tra il modello BIM e gli strumenti di simulazione delle prestazioni acustiche, dalla letteratura scientifica emerge che, nonostante vi siano numerose ricerche sviluppate sul tema, non si è ancora raggiunta una completa interoperabilità e bidirezionalità nel passaggio dei dati tra i diversi software. È infatti possibile, attraverso la creazione di specifici algoritmi, estrarre i dati dai modelli BIM per immetterli nei software di simulazione acustica; tuttavia, non risulta ancora possibile il contrario, ovvero ritrasferire al modello BIM le caratteristiche di prestazione acustica simulate con gli strumenti esterni. A fronte di questi limiti, nella pratica professionale la tendenza attuale è quella di sviluppare le analisi acustiche in maniera indipendente rispetto al modello BIM, e successive ricerche sono necessarie per raggiungere una piena corrispondenza tra i due aspetti. Per questo motivo, nel quadro esigenziale sono stati soltanto individuati i riferimenti bibliografici che approfondiscono il tema, rimandando al confronto con gli esperti l'individuazione delle specifiche strategie e *tools* da utilizzare per la simulazione acustica.

Continua da pagina precedente

FRUIBILITÀ	---	Accessibilità Integrazione di dispositivi atti a favorire l'accessibilità e la fruizione in sicurezza e in maniera autonoma da parte di utenti con disabilità	Accessibilità Idonea progettazione e dimensionamento degli spazi per consentire l'accessibilità e la fruizione in sicurezza e in maniera autonoma da parte di utenti con disabilità
	---	Controllo delle dispersioni di calore Contenimento entro determinati limiti delle perdite di calore per conduzione, convezione, irraggiamento o rinnovo aria	---
GESTIONE	---	Manutenibilità e riparabilità Capacità del sistema edilizio di mantenere integre nel tempo le capacità prestazionali anche a seguito di ispezioni e manutenzioni	---
	---	Economicità Riduzione e contenimento dei costi di acquisto e gestione, legati ai consumi energetici e alla manutenzione del manufatto edilizio	---
	Durabilità dei componenti Capacità dei componenti edilizi di mantenere inalterate le proprie prestazioni, senza manutenzione straordinaria, per un tempo di almeno cinque anni	---	---
	Rapidità di assemblaggio Attitudine del sistema edilizio ad essere scomponibile in sotto-sistemi e componenti aggregabili che possono essere facilmente e rapidamente assemblabili attraverso sequenze semi-automatizzate in officina	---	---
	Manovrabilità Capacità dei componenti del sistema edilizio ad essere facilmente manovrabili e installabili da parte di manodopera non specializzata e mezzi ordinari	---	---
	Trasportabilità Attitudine dei componenti e sistemi ad essere stoccati con il minor volume, e di essere trasportati con l'uso di mezzi ordinari	---	---
	Disassemblabilità e disintegrabilità Possibilità di disassemblare selettivamente gli elementi tecnici per avviarli a cicli di riuso, reimpiego e/o riciclo	---	---

Continua da pagina precedente

<p>D.P.R. 24 luglio 1996, Regolamento recante norme per l'eliminazione delle barriere architettoniche negli edifici, spazi e servizi pubblici Rimanda all'applicazione degli standard e delle prescrizioni tecnico-dimensionali contenute nel D.M. 14 giugno 1989 n.236</p>	Autodesk® Revit	---
<p>D.M. 14 giugno 1989 n.236, Prescrizioni tecniche necessarie a garantire l'accessibilità, l'adattabilità e la visitabilità degli edifici privati e di edilizia residenziale pubblica, ai fini del superamento e dell'eliminazione delle barriere architettoniche Stabilisce le prescrizioni tecnico-costruttive per garantire l'accessibilità degli spazi, tra cui la larghezza minima dei percorsi e dei passaggi e le modalità di superamento dei dislivelli.</p>	Autodesk® Revit	---
<p>D.M. 11 ottobre 2017, Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici Stabilisce i requisiti di prestazione energetica per gli edifici pubblici, richiamando l'applicazione del D.M. 26/06/2015</p>	---	IES Virtual Environment
<p>D.M. 26 giugno 2015, Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici Stabilisce i requisiti di prestazione energetica per gli edifici net-Zero Energy</p>	---	---
---	---	---
---	Autodesk® Revit	---
---	---	---
---	---	---
<p>D.Lgs. 285/1992, Nuovo Codice della Strada Devono essere rispettati i limiti di sagoma e peso per trasporti ordinari (2,55 x 3,00 x 12,00 m)</p>	---	---
---	---	---
<p>D.M. 11 ottobre 2017, Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici Deve essere previsto un piano di dismissione dell'opera per la gestione del fine-vita</p>	---	---

Continua da pagina precedente

GESTIONE	---	Reversibilità e adattabilità Possibilità di dismettere il manufatto e/o adattarlo per successivi usi, anche con diversa destinazione funzionale, una volta terminato l'uso	---
	Possibilità di reimpiego dei componenti Capacità dei componenti del sistema edilizio tecnologico di essere dismessi, stoccati e ricollocati in altro sito mantenendo le proprie prestazioni	---	---
INTEGRABILITÀ	Integrabilità tecnologica Progettazione dei componenti costruttivi in modo che possano subire integrazioni funzionali	---	---
	---	Integrabilità spaziale Attitudine delle unità ambientali a subire ampliamenti e/o demolizioni selettive mantenendo inalterata la funzionalità del nucleo e degli spazi originari	---
	---	---	Aggregabilità spaziale Attitudine delle unità ambientali ad essere aggregate e unite in diversi e molteplici layout funzionali
ASPETTO	Pulibilità Attitudine dei materiali superficiali a consentire la rimozione di sostanze indesiderate	---	---
	---	Riconoscibilità Integrazione di strategie progettuali atte a promuovere una facile distinzione tra le diverse destinazioni d'uso	---
	Personalizzazione Possibilità per i componenti di integrare diversi elementi tecnici e materiali	Personalizzazione Capacità del sistema tecnologico di accogliere modifiche di carattere morfologico e/o dimensionale senza apportare modifiche alla catena produttiva	---
SALVAGUARDIA AMBIENTALE E UTILIZZO RAZIONALE DELLE RISORSE	Possibilità di riciclo dei materiali Attitudine dei materiali e componenti edilizi ad essere riciclati al termine del ciclo di vita (percentuale)	---	---
	Utilizzo di materiali riciclati Impiego di materiali provenienti da riciclo di risorse (percentuale)	---	---
	Utilizzo di materiali eco-compatibili Impiego di materiali con ridotto impatto e carico ambientale durante l'intero ciclo di vita	---	---
	Riduzione dell'impatto ambientale del ciclo di vita Adozione di strategie tecnologico-costruttive e materiali con un ridotto impatto in ottica LCA	---	---
	---	Efficienza energetica Riduzione dei consumi energetici globali del manufatto, anche attraverso l'uso di sistemi attivi per il controllo ambientale a ridotto consumo	---
	---	Utilizzo di risorse energetiche rinnovabili Impiego di sistemi attivi per il controllo ambientale che utilizzano fonti energetiche rinnovabili	---

Continua da pagina precedente

	---	---
	---	---
	---	---
	---	---
	---	---
	Prove di laboratorio	---
	---	---
	---	---
<p>D.M. 11 ottobre 2017, Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici</p> <p>Almeno il 50% del peso dei componenti edilizi e degli elementi prefabbricati, valutato rispetto al totale esclusi gli impianti, deve essere sottoponibile a fine vita a demolizione selettiva ed essere riciclabile o riutilizzabile</p>	---	---
<p>D.M. 11 ottobre 2017, Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici</p> <p>Deve essere prevista una percentuale minima del 15% di materiali riciclati rispetto al totale in peso dell'edificio</p>	---	---
	---	---
	---	OneClick LCA ⁶
<p>D.M. 26 giugno 2015, Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici</p> <p>Stabilisce i requisiti di prestazione energetica per gli edifici net-Zero Energy</p>	---	---
<p>D.M. 11 ottobre 2017, Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici</p> <p>Requisiti riguardanti l'uso di risorse rinnovabili per la copertura del fabbisogno energetico</p>	---	---

6. OneClick LCA è un software integrabile con piattaforme BIM che consente, importando dati da strumenti come Austodesk® Revit o IES VE, di produrre analisi di impatto ambientale LCA conformi alle procedure standardizzate EN e ISO, nonché di verificare le prescrizioni richieste dai maggiori protocolli di certificazione come LEED, BREEAM, ecc. (<https://www.oneclicklca.com/>)

2.3. Esplorazione delle alternative di progetto e progettazione dell'unità CARES

Seguendo un approccio di tipo esigenziale-prestazionale, la progettazione del modello di unità scolastica emergenziale **CARES**, riferita al caso applicativo della **Scuola Primaria "J. Piaget" di Altarello (CT)** (Fig.19), è stata sviluppata impiegando i modelli digitalizzati dei componenti del sistema costruttivo per integrare i diversi processi di esplorazione, verifica e riprogettazione delle soluzioni architettonico-costruttive. In questo modo, si è potuto condensare in un unico flusso iterativo quello che altrimenti, impiegando i precedenti strumenti e metodi di lavoro, sarebbe stato un percorso consequenziale di concettualizzazione dell'idea, verifica, progettazione definitiva ed esecutiva. Il progetto in questa fase è stato operativamente portato avanti dagli operatori aziendali, che hanno utilizzato i modelli digitalizzati dei pannelli e il modello di progetto per svolgere le diverse operazioni richieste per l'elaborazione della proposta progettuale. La scelta in questa direzione è motivata dalla volontà di testare, sottoponendolo ad un utente-tipo, il modello di processo sviluppato, in termini di funzionalità, utilizzabilità e integrabilità nelle modalità di lavoro aziendali. L'attività è stata affiancata da un costante confronto con gli operatori incaricati di utilizzare gli strumenti BIM, acquisendo i *feedback* necessari a correggerli e affinarli. Lo sviluppo delle aggregazioni di progetto è stato progressivamente supportato dalla verifica delle soluzioni rispetto al quadro esigenziale e vincoli normativi espressi precedentemente, assicurandosi che la proposta progettuale fosse rispondente alle istanze di qualità spaziale, tecnico-costruttiva e di sostenibilità.

L'aggregazione delle famiglie di pannelli e la loro customizzazione è avvenuta all'interno del modello di progetto sviluppato nelle fasi di lavoro precedenti. Tale strumento è stato utilizzato come un vero e proprio "configuratore" in cui i modelli digitalizzati in BIM dei pannelli sono stati caricati e customizzati negli aspetti morfologico-dimensionali per esplorare le diverse opzioni progettuali Fig.20. Sfruttando le capacità di interrogazione del modello BIM, è stato possibile verificare e comparare simultaneamente le diverse soluzioni progettuali sperimentate, selezionando quella che meglio rispondeva al quadro esigenziale e al programma edilizio. Una volta selezionata la configurazione progettuale finale dell'unità **CARES**, sono stati integrati nel modello BIM gli elementi di completamento a partire da librerie esterne, ovvero i sistemi di ancoraggio⁷, infissi, attacco a terra e rivestimenti.

Il modello di aula **CARES** è costituito da un volume compatto sviluppato in altezza su un unico piano fuori terra, di dimensioni in pianta 6.37x7.40 m e una superficie utile di 42.60 m². Lo spazio è coperto da una copertura a doppia falda inclinata (22° di inclinazione), con altezza massima di colmo di 4.22 m (Figg.21-24). L'intervento si colloca nel cortile della scuola "J. Piaget" (Altarello) e il volume è posto in prossimità dell'ingresso all'edificio esistente sul lato est, distaccato 2.00 m dal corpo di fabbrica (Fig.25). L'ingresso al nuovo spazio avviene dall'interno della scuola esistente, in modo da rendere controllabili gli accessi, attraverso un passaggio coperto. La Tabella 14 riporta le principali caratteristiche dimensionali dell'aula, con riferimento ai limiti stabiliti dalla normativa.

7. In considerazione della specificità del sistema di ancoraggio, le piastre in acciaio di collegamento tra i pannelli sono state modellate contestualmente alla modellazione parametrica in BIM degli elementi del sistema costruttivo.



Fig.19 - Foto aerea e individuazione del lotto della Scuola Primaria "J.Piaget" (Altarello, CT), scelta come caso applicativo per lo sviluppo del progetto CARES (Credits: Elaborazione da © 2022 Google da www.google.it/maps)

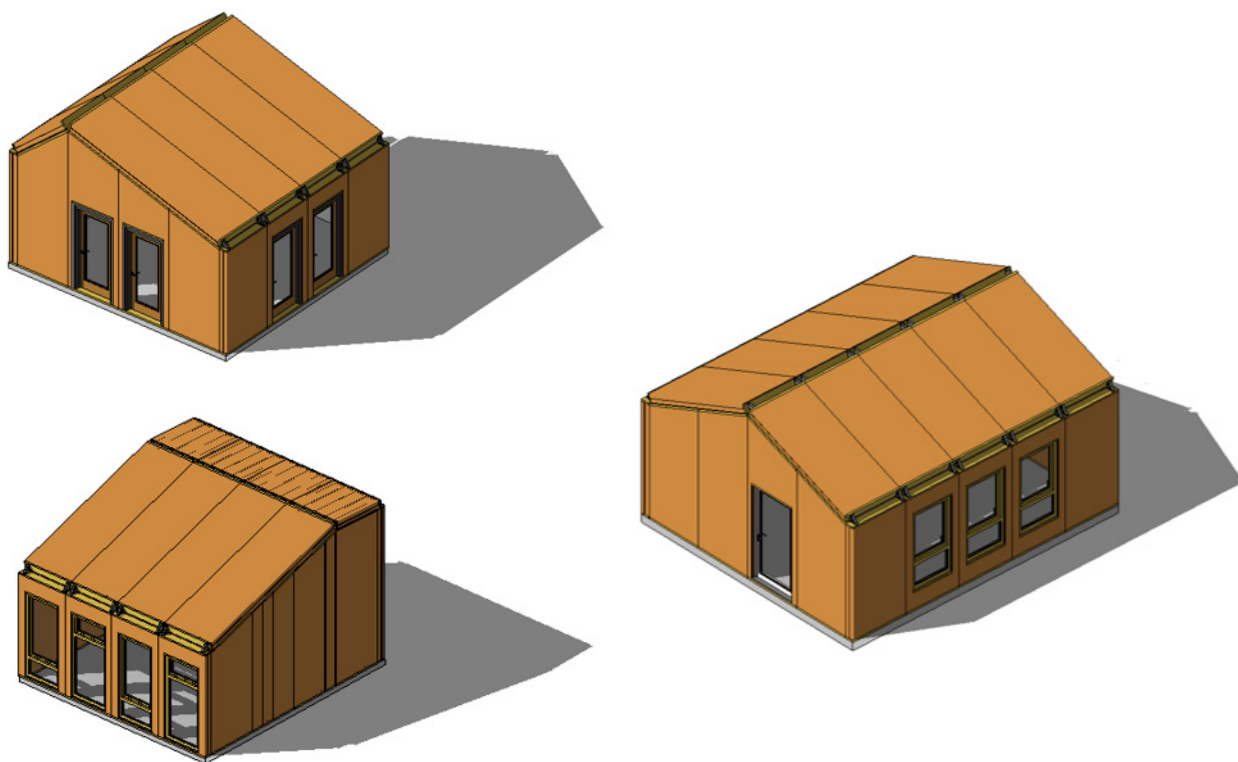


Fig.20 - Esplorazione delle alternative progettuali attraverso i componenti digitalizzati in BIM (Elaborazione da modello Autodesk® Revit) (Credits: E.Belardi, Archicart®, 2021)

Tab.14 - Caratteristiche dimensionali del modello di unità scolastica CARES

Caratteristiche dell'aula		Prescrizioni da normativa
Numero di alunni previsti	23 alunni	D.M. 26/08/1992 Affollamento massimo: 26 persone (25 alunni + 1 insegnante oppure 24 alunni + 1 insegnante di classe + 1 insegnante di sostegno)
Superficie di pavimento	42.60 m ²	D.M. 18/12/1975 Superficie minima: 1.80 m ² /alunno (41.40 m ²)
Altezza media Altezza minima (gronda)	3.53 m 2.83 m	D.M. 18/12/1975 Altezza minima degli spazi per attività didattiche: 3 m Altezza minima di gronda con tetto a falde: 2.70 m
Superficie finestrata	12.54 m ²	---
Rapporto aeroilluminante	0.294	D.M. 11/10/2017 Prescritto minimo 1/8 (0.125)
Larghezza della via di fuga	1.23 m	D.M. 26/08/1992 Larghezza minima di due moduli (2M), con M = 60 cm
Larghezza delle porte	1.23 m	D.M. 14/16/1989 Larghezza minima 80 cm
Presenza di dislivelli	Calpestio a +0.30 m rispetto alla quota di imposta dell'edificio, con l'ingresso all'aula che avviene dall'interno dell'edificio esistente a +0.30 m	Richiesta la presenza di una rampa all'esterno dell'edificio esistente per l'accesso, con pendenza inferiore all'8% e larghezza minima di 90 cm

A livello tecnologico, l'unità è realizzata impiegando 18 pannelli verticali e 10 pannelli orizzontali prefabbricati in cartone ondulato, basati su un modulo di larghezza 180 cm, spessore 220 cm e altezza variabile tra 288 a 410 cm. Ciascun pannello è composto da una struttura interna di quattro tubolari in cartone ondulato a tripla onda, confinata da due fogli esterni di cartone; all'interno dei due tubolari più esterni sono integrati i montanti in legno che assolvono alla funzione strutturale, collegati alle tavole di chiusura inferiori e superiori. Gli infissi sono del tipo a doppio vetro con telaio in legno lamellare, mentre la porta di ingresso è una porta tagliafuoco vetrata con maniglione antipanic. In ottemperanza alle prescrizioni del Decreto CAM, le chiusure trasparenti sono state integrate da schermature solari a lamelle fisse in alluminio. Le schermature sono state poste a circa 2/3 dell'altezza dell'infisso dal davanzale, affinché potessero contemporaneamente proteggere dall'incidenza del sole nelle stagioni più calde, consentire l'ingresso della radiazione solare in inverno e beneficiare dell'accumulo passivo di calore, e favorire un'illuminazione solare diffusa attraverso la riflessione della luce solare verso l'intradosso della copertura. La scelta del rivestimento esterno si è indirizzata sull'impiego di un telo in materiale plastico (PVC) tensionato attraverso una sotto-struttura in alluminio ancorata ai pannelli. I pannelli poggiano su un sistema di fondazione a platea in calcestruzzo, soluzione sviluppata in conseguenza di una specifica richiesta dell'amministrazione pubblica, ma che potrebbe essere sostituita da un sistema di appoggi puntuali e regolabili in materiale plastico, al fine di garantire una maggiore reversibilità dell'intervento al termine del ciclo di uso dell'edificio.

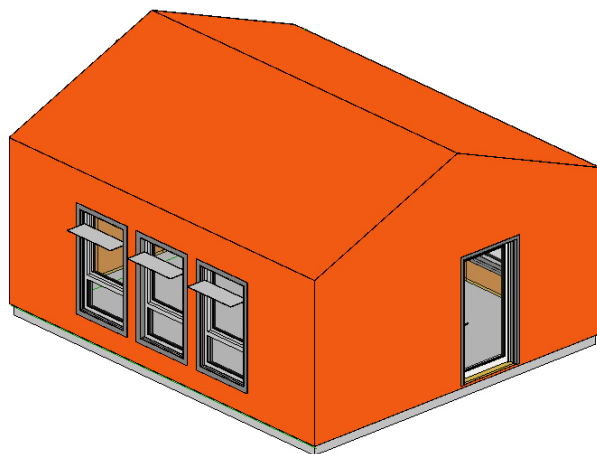


Fig.21 - Modello digitalizzato dell'unità scolastica CARES, elaborato aggregando i componenti BIM precedentemente sviluppati (Elaborazione da modello Autodesk® Revit, V. Appendici, "PRJ") (Credits: E.Belardi, Archicart®, 2021)

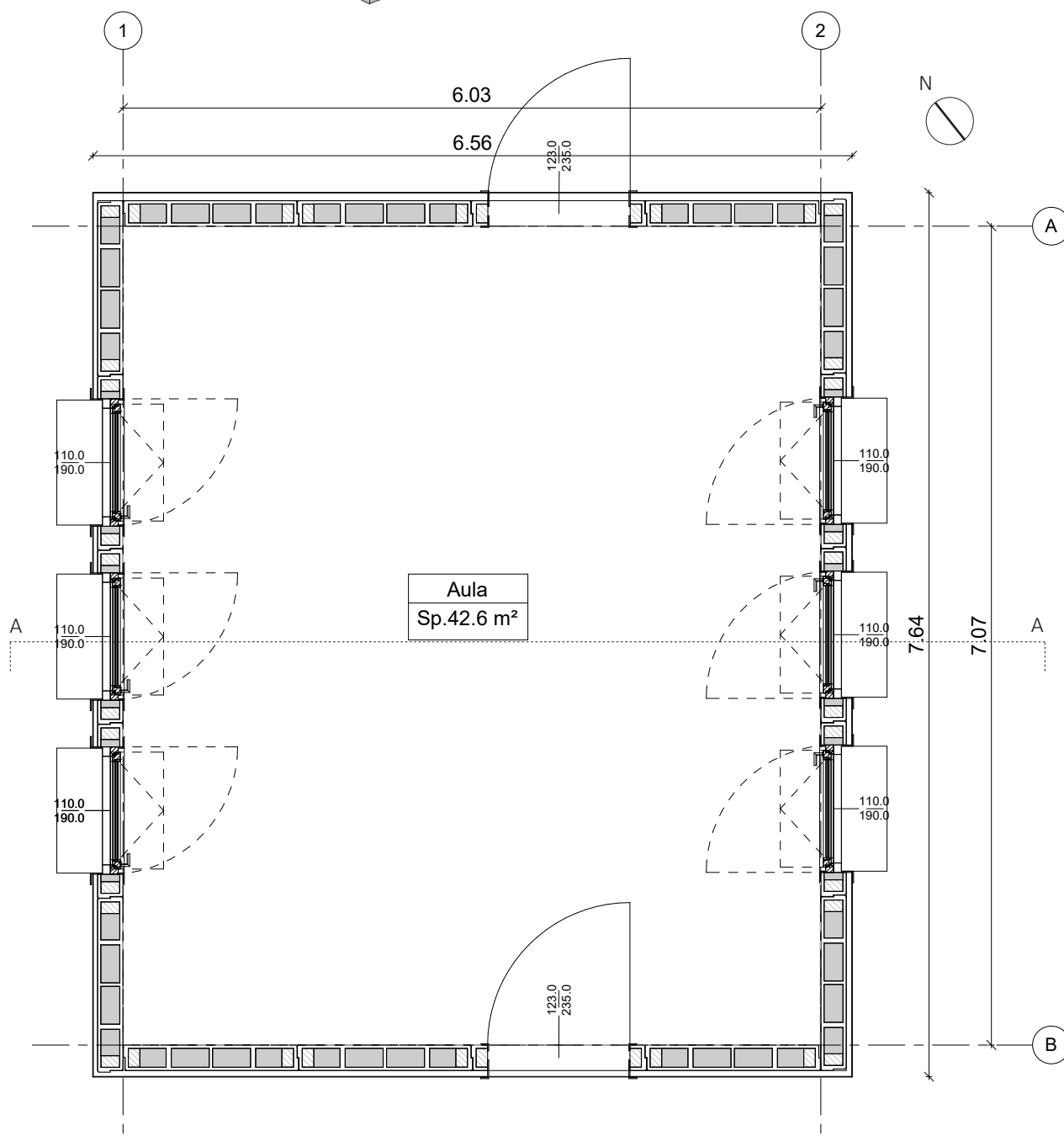


Fig.22 - Pianta dell'unità scolastica CARES, scala 1:50 (Elaborazione da modello Autodesk® Revit, V. Appendici, "PRJ") (Credits: E.Belardi, Archicart®, 2021)

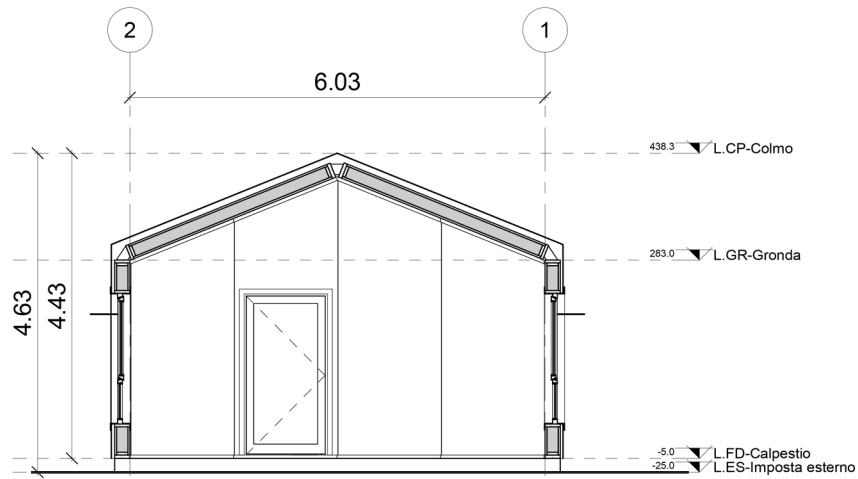


Fig.23 - Sezione (AA) dell'unità scolastica CARES, scala 1:100
 (Elaborazione da modello Autodesk® Revit, V. Appendici, "PRJ") (Credits: E.Belardi, Archicart®, 2021)

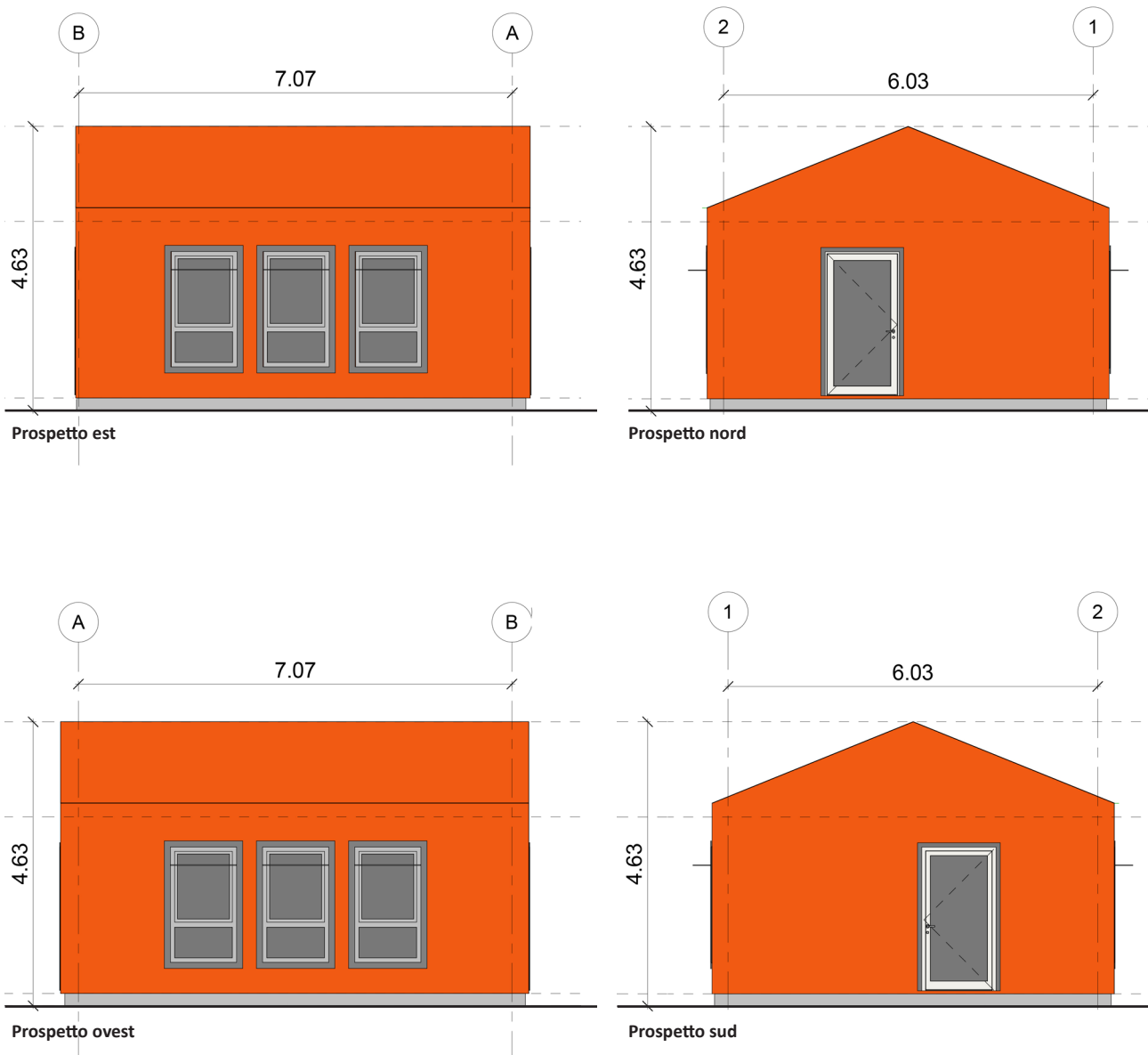


Fig.24 - Prospetti dell'unità scolastica CARES, scala 1:100
 (Elaborazione da modello Autodesk® Revit, V. Appendici, "PRJ") (Credits: E.Belardi, Archicart®, 2021)



Fig.25 - Inserimento nel contesto: ipotesi di installazione presso la Scuola "J.Piaget" di Altarello (CT) (Credits: © Archicart®, 2021)

In previsione della produzione *off-site* dei componenti dell'unità, il modello di progetto in cui è stata aggregata la soluzione progettuale ha permesso di estrapolare una serie di dati finalizzati a valutare l'efficacia della strategia di digitalizzazione rispetto agli obiettivi di ottimizzazione delle risorse, razionalizzazione delle sequenze del processo, controllo degli ordini e della produzione. Nello specifico, i principali dati estraibili a partire dal modello digitalizzato dell'edificio sono:

- **Attraverso l'abaco C – PAN_SW**, è possibile ottenere la distinta codificata dei pannelli che, richiamata negli abachi di computo dei materiali, e in particolare nel calcolo dei fogli di cartone (C – CTO_FE/TB), consente di verificare il quantitativo e la tipologia di pezzi da produrre, creando una *check-list* rispetto a cui tenere traccia dello stato di avanzamento delle lavorazioni (Fig.26);

<C/ PAN_SW>											
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
PAN_SW: Tipologia	N.	L.	H.	H.dx	H.sx	TB.1_H	TB.2_H	TB.3_H	TB.4_H	TB.4_H2	PAN_INF
PAN_SW_O: PAN_SW_O	10	1500 mm	3200 mm								
PAN_SW_V: PAN_SW_V	4	1500 mm	2880 mm								<input type="checkbox"/>
PAN_SW_V: PAN_SW_V-INF	6	1500 mm	2880 mm								<input checked="" type="checkbox"/>
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c	1	1500 mm		4089 mm	3483 mm	3979 mm	3830 mm	3681 mm	3531 mm	3382 mm	<input type="checkbox"/>
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c-INF	1	1500 mm		4089 mm	3483 mm	3979 mm	3830 mm	3681 mm	3531 mm	3382 mm	<input checked="" type="checkbox"/>
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.d	2	1500 mm		3482 mm	2876 mm	3372 mm	3223 mm	3073 mm	2924 mm	2775 mm	<input type="checkbox"/>
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.a	2	1500 mm		2881 mm	3487 mm	2783 mm	2932 mm	3082 mm	2932 mm	3082 mm	<input type="checkbox"/>
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b	1	1500 mm		3489 mm	4095 mm	3390 mm	3540 mm	3689 mm	3540 mm	3689 mm	<input type="checkbox"/>
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b-INF	1	1500 mm		3489 mm	4095 mm	3390 mm	3540 mm	3689 mm	3540 mm	3689 mm	<input checked="" type="checkbox"/>

Fig.26 - Abaco C/ PAN_SW: distinta codificata dei pannelli utilizzati per l'unità CARES (Elaborazione da modello Autodesk® Revit, V. Appendici, "PRJ") (Credits: Elaborazione personale)

- **Negli abachi C – CTO_FE/TB** viene mostrata la distinta e dimensione esatta dei pezzi (fogli di cartone tagliati) da produrre (Fig.27). Nello stesso abaco, attraverso i campi modificabili in cui si inseriscono le dimensioni dei fogli di cartone di partenza, è possibile operare una progressiva ottimizzazione del quantitativo di materiale. Allo scopo di valutare l'efficacia e le potenzialità del calcolo automatizzato rispetto alla riduzione del consumo di cartone, una fase successiva della sperimentazione ha previsto la comparazione di una combinazione di alternative del numero e dimensione dei fogli di cartone rispetto alla attuale impostazione del magazzino, che prevede l'utilizzo di fogli con dimensioni standard 2400 x 3100 mm. I risultati del calcolo e della comparazione tra i dati sono descritti e approfonditi al capitolo successivo (Pt. III, Cap. 2.4);

(a) <C/ CTO_FE>																		
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
PAN_SW	N.	D.cd	D.md	MD	CD	PAN_SW_HG	FE_L	FE_H	FEt_H	FEo_H	FEit_H	FEot_H	N*FE/pan.	Quantità fogli (FE)	C.u. (€/foglio)	Costo totale CTO (€)	Sup.CTO (mq)	
PAN_SW_O: PAN_SW_O	10	2400	3100		Si	150.0	1803	1500	1800					4	40	2.12	84.8	297.60 m²
PAN_SW_V: PAN_SW_V	4	2400	3100		Si	150.0	1803	2790						2	12	2.12	25.44	89.28 m²
PAN_SW_V: PAN_SW_V-INF	6	2400	3100		Si	150.0	1803	2790						2	18	2.12	38.16	133.92 m²
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c	1	2400	3100		Si	150.0	1803		1500	1500	2472.2	2477.8	4	4	2.12	8.48	29.76 m²	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c-INF	1	2400	3100		Si	150.0	1803		1500	1500	2472.2	2477.8	4	4	2.12	8.48	29.76 m²	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.d	2	2400	3100		Si	150.0	1803		1500	1500	1864.9	1870.5	4	8	2.12	16.96	59.52 m²	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.a	2	2400	3100		Si	150.0	1803		1500	1500	1864.9	1870.5	4	8	2.12	16.96	59.52 m²	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b	1	2400	3100		Si	150.0	1803		1500	1500	2477.8	2472.2	4	4	2.12	8.48	29.76 m²	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b-INF	1	2400	3100		Si	150.0	1803		1500	1500	2477.8	2472.2	4	4	2.12	8.48	29.76 m²	
														102		216.24	758.88 m²	

(b) <C/ CTO_TB>																	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
PAN_SW	N.	D.cd	D.md	MD	CD	PAN_SW_HG	TB_L	TB_H	TBt_H	TBlat_L	TBlat_H	Quantità fogli (TB)	Quantità fogli (TBlat)	C.u. (€/foglio)	Costo totale CTO (€)	CTO_TB Sup	CTO_TBlat Sup
PAN_SW_O: PAN_SW_O	10	2400	3100		Si	150.0	1169	1500	1600			60	0	2.12	127.2	446.40 m²	0.00 m²
PAN_SW_V: PAN_SW_V	4	2400	3100		Si	150.0	1169	2790				16	0	2.12	33.92	119.04 m²	
PAN_SW_V: PAN_SW_V-INF	6	2400	3100		Si	150.0	1169	2790		690	1980	18	12	2.12	63.6	133.92 m²	89.28 m²
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c	1	2400	3100		Si	150.0	1169	1500	2480.7			5	0	2.12	12.72	44.64 m²	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c-INF	1	2400	3100		Si	150.0	1169	1500	2480.7	560	2390	4.5	2	2.12	13.78	33.48 m²	14.88 m²
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.d	2	2400	3100		Si	150.0	1169	1500	1873.4			12	0	2.12	25.44	89.28 m²	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.a	2	2400	3100		Si	150.0	1169	1500	1873.4			12	0	2.12	25.44	89.28 m²	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b	1	2400	3100		Si	150.0	1169	1500	2480.7			5	0	2.12	12.72	44.64 m²	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b-INF	1	2400	3100		Si	150.0	1169	1500	2480.7	560	2390	4.5	2	2.12	13.78	33.48 m²	14.88 m²
												139	16		201.4	1034.16 m²	119.04 m²

Fig.27 - Abaco di computo dei materiali C/ CTO-FE (a) e C/ CTO-TB (b): dimensioni e quantità ottimizzata di fogli di cartone da impiegare per la produzione (Elaborazione da modello Autodesk® Revit, V. Appendici, "PRJ") (Credits: Elaborazione personale)

- **Utilizzando gli abachi di computo** si ha la distinta degli elementi di completamento, ovvero le superfici degli elementi di finitura interni ed esterni (Fig.28), la lunghezza dei giunti orizzontali per i pannelli con altezza superiore a 3100 mm (Fig.29), i volumi di materiale isolante da insufflare (Fig.30), le sezioni e lunghezze dei profili in legno- montanti e tavole di chiusura - (Fig.31), la quantità e le dimensioni delle piastre di ancoraggio (Fig.32). In ciascun abaco sono richiamate anche le voci di costo relative ai diversi componenti e materiali, modificabili anche all'interno della stessa finestra e che si aggiornano al variare delle configurazioni progettuali. In questo modo, gli operatori hanno a disposizione uno strumento per verificare e controllare simultaneamente le diverse variabili connesse alle scelte progettuali, che vengono messe a sistema e ricalcolate al variare dei dati immessi in input;

<C/ FIN>									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Famiglia e tipo	N.	MAT_PAN_FIN.i	Quantità F	MAT_PAN_FIN.o	Quantità FIN.o	C.u. FIN.i (€/mq)	C.t. FIN.i (€)	C.u. FIN.o (€/mq)	C.t. FIN.o (€)
PAN_SW_O: PAN_SW_O	10	FIN_Spruzzo	46.65 m²	FIN_Spruzzo	46.65 m²	20	933	20	933
PAN_SW_V: PAN_SW_V	4	FIN_Spruzzo	16.74 m²	FIN_Spruzzo	16.74 m²	20	335	20	335
PAN_SW_V: PAN_SW_V-INF	6	FIN_Spruzzo	12.04 m²	FIN_Spruzzo	12.04 m²	20	241	20	241
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c	1	FIN_Spruzzo	5.53 m²	FIN_Spruzzo	5.53 m²	20	111	20	111
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c-INF	1	FIN_Spruzzo	2.59 m²	FIN_Spruzzo	2.59 m²	20	52	20	52
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.d	2	FIN_Spruzzo	9.23 m²	FIN_Spruzzo	9.23 m²	20	185	20	185
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.a	2	FIN_Spruzzo	9.23 m²	FIN_Spruzzo	9.23 m²	20	185	20	185
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b	1	FIN_Spruzzo	5.53 m²	FIN_Spruzzo	5.53 m²	20	111	20	111
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b-INF	1	FIN_Spruzzo	2.59 m²	FIN_Spruzzo	2.59 m²	20	52	20	52
	28		110.13 m²		110.13 m²		2203		2203

Fig.28 - Abaco di computo dei materiali C/ FIN: distinta e quantità dei materiali di finitura (Elaborazione da modello Autodesk® Revit, V. Appendici, "PRJ") (Credits: Elaborazione personale)

<C/ GNT>					
A	B	C	D	E	F
PAN_SW	N.	Materiale	LST_AL_L	LST_DO_1cm_L	LST_TO_1cm_L
PAN_SW_O: PAN_SW_O	10	PAN_CO	30 m	30 m	30 m
PAN_SW_V: PAN_SW_V	4	PAN_CO			
PAN_SW_V: PAN_SW_V-INF	6	PAN_CO			
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c	1	PAN_CO	3 m	3 m	3 m
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c-INF	1	PAN_CO	3 m	3 m	3 m
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.d	2	PAN_CO	6 m	6 m	6 m
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.a	2	PAN_CO	6 m	6 m	6 m
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b	1	PAN_CO	3 m	3 m	3 m
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b-INF	1	PAN_CO	3 m	3 m	3 m
	28		54 m	54 m	54 m

Fig.29 - Abaco di computo dei materiali C/ GNT: distinta e quantità dei giunti di separazione in cartone (Elaborazione da modello Autodesk® Revit, V. Appendici, "PRJ") (Credits: Elaborazione personale)

<C/ ISO>					
A	B	C	D	E	F
PAN_SW	N.	MAT_PAN_ISO	Volume	Costo unitario (€/mc)	Costo totale (€)
PAN_SW_O: PAN_SW_O	10	ISO_Fibra di cellulosa	5.52 m³	114.37	630.84
PAN_SW_V: PAN_SW_V	4	ISO_Fibra di cellulosa	2.27 m³	114.37	259.54
PAN_SW_V: PAN_SW_V-INF	6	ISO_Fibra di cellulosa	0.94 m³	114.37	107.43
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c	1	ISO_Fibra di cellulosa	0.74 m³	114.37	84.99
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c-INF	1	ISO_Fibra di cellulosa	0.19 m³	114.37	21.58
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.d	2	ISO_Fibra di cellulosa	1.23 m³	114.37	140.90
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.a	2	ISO_Fibra di cellulosa	1.23 m³	114.37	140.90
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b	1	ISO_Fibra di cellulosa	0.74 m³	114.37	84.99
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b-INF	1	ISO_Fibra di cellulosa	0.19 m³	114.37	21.58
28			13.05 m³		1492.76

Fig.30 - Abaco di computo dei materiali C/ ISO: quantità aggregate di materiale isolante (Elaborazione da modello Autodesk® Revit, V. Appendici, "PRJ") (Credits: Elaborazione personale)

<C/ PROF_LEG>																																			
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y											
PAN_SW	N.	MONTE	L	Ldx	Lsx	Q	TRAV_BASE	L	Q	TRAV_COP	L	Q	TRAV_INF	L	Q	TOZ	L1	Q1	L2	Q2	L3	Q3	L4	Q4											
PAN_SW_O: PAN_SW_O	10	160x100 mm	3110			20	220x40 mm	1500	10	220x50 mm	1500	10		0	160x40 mm	327.5	20	327.5	20	227.5	20	227.5	20	227.5	20										
PAN_SW_V: PAN_SW_V	4	160x100 mm	2790			8	220x50 mm	1500	4	220x40 mm	1500	4	220x40 mm		160x40 mm	327.5	8	327.5	8	227.5	8	227.5	8	227.5	8										
PAN_SW_V: PAN_SW_V-INF	6	160x100 mm	2790			12	220x50 mm	1500	6	220x40 mm	1500	6	220x40 mm	110.0	12	160x40 mm	327.5	12	327.5	12	227.5	12	227.5	12	227.5	12									
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c	1	160x100 mm		3990.7	3379	2	220x50 mm	1500	1	220x50 mm	1632.9	1	220x40 mm		160x40 mm	327.5	2	337.1	2	227.5	2	229.2	2	229.2	2										
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c-INF	1	160x100 mm		3990.7	3379	2	220x50 mm	1500	1	220x50 mm	1632.9	1	220x40 mm	123.0	2	160x40 mm	327.5	2	337.1	2	227.5	2	229.2	2	229.2	2									
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.d	2	160x100 mm		3383.4	2771.7	4	220x50 mm	1500	2	220x50 mm	1632.9	2	220x40 mm		160x40 mm	327.5	4	337.1	4	227.5	4	229.2	4	229.2	4										
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.a	2	160x100 mm		2771.7	3383.4	4	220x50 mm	1500	2	220x50 mm	1632.9	2	220x40 mm		160x40 mm	327.5	4	337.1	4	227.5	4	229.2	4	229.2	4										
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b	1	160x100 mm		3379	3990.7	2	220x50 mm	1500	1	220x50 mm	1632.9	1	220x40 mm		160x40 mm	327.5	2	337.1	2	227.5	2	229.2	2	229.2	2										
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b-INF	1	160x100 mm		3379	3990.7	2	220x50 mm	1500	1	220x50 mm	1632.9	1	220x40 mm	123.0	2	160x40 mm	327.5	2	337.1	2	227.5	2	229.2	2	229.2	2									
56						28						28						16						56						56					

Fig.31 - Abaco di computo dei materiali C/ PROF_LEG: distinta dei profili in legno di completamento (montanti e tavole orizzontali) (Elaborazione da modello Autodesk® Revit, V. Appendici, "PRJ") (Credits: Elaborazione personale)

<C/ PSTR>														
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
PSTR	N.	ANG	BASE_B	BASE_H	Foro (d)	PASSO_B	PASSO_H	BARRE_M8X200	PSTR_SP	BARRE_M10X200	BULLONI_M8X40	RONDELLE_8.4x16	RONDELLE_10.5x20	Costo totale (€)
PSTR_SW: PSTR_SW_COP	10	46.00°	55	160	10	30	80	60	5	0	40	60	80	250
PSTR_SW: PSTR_SW_GRN	20	22.00°	55	160	10	30	80	120	5	0	80	120	160	500
30		180		0		120		180		240		750		

Fig.32 - Abaco di computo dei materiali C/ PSTR: distinta delle piastre di ancoraggio e della minuteria necessaria all'assemblaggio (Elaborazione da modello Autodesk® Revit, V. Appendici, "PRJ") (Credits: Elaborazione personale)

- **Attraverso gli abachi di produzione (P -) P - 01-T_FE, P - 02-T_TB, P - 03-C_FE, P - 04-C_TB**, il modello restituisce automaticamente le istruzioni per la fabbricazione per ciascuna tipologia di pannello, ovvero calcola le coordinate macchina necessarie ad eseguire le lavorazioni di taglio e cordonatura dei fogli di cartone (Fig.33). I dati raccolti possono essere quindi trasferiti direttamente al software di controllo del macchinario, attraverso l'esportazione dell'abaco in formato di interscambio (per esempio file .csv o .txt⁸). Tale possibilità permette di gestire in maniera automatizzata la variabilità del progetto, senza richiedere la riprogrammazione delle sequenze del processo e l'intervento degli operatori per ricalcolare le specifiche esecutive ad ogni diversa configurazione del prodotto finale.

8. A questo proposito, è opportuno precisare che la possibilità di utilizzare tali formati file è stata confermata preliminarmente dal tecnico incaricato della programmazione software del macchinario; come approfondito negli sviluppi futuri, tale possibilità dovrà essere validata attraverso la produzione di un primo pannello per testare il trasferimento delle informazioni. In particolare, sarà necessario verificare se e come esista la necessità di dover intervenire manualmente per modificare le stringhe di testo elaborate in output dal modello BIM per rendere il file leggibile dal software che gestisce il macchinario.

(a) <P/ T_FE>

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	
PAN_SW	N.	MD	CD	FE_T1.x	FE_T1.y	FE_T1.yo	FE_T2.x	FE_T2.y	FE_T2.yo	FE_T2.x	FE_T2.x	FE_T2.x	FE_T2.x	FE_T2.x	FE_T2.x	FE_T3.x1	FE_T3.x2	FE_T3.y	FE_T3.y0	FE_T4.x1	FE_T4.x2	FE_T4.y	FE_T4.y0
PAN_SW_O: PAN_SW_O	10		Si	1803	2400	0	1500	1803	0			1600											
PAN_SW_V: PAN_SW_V	4		Si	1803	2400	0	2790	1803	0			0				0	0	0	0	0	0	0	0
PAN_SW_V: PAN_SW_V-INF	6		Si	1803	2400	0	2790	1803	0			0				1395	295	1380	410	2390	410	1100	323
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c	1		Si	1803	3100	0		1803	0	1500	1500		2472.2	2477.8									
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c-INF	1		Si	1803	3100	0		1803	0	1500	1500		2472.2	2477.8	1460	230	2390	0	2390	0	1230	258	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.d	2		Si	1803	3100	0		1803	0	1500	1500		1864.9	1870.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.a	2		Si	1803	3100	0		1803	0	1500	1500		1870.5	1864.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b	1		Si	1803	3100	0		1803	0	1500	1500		2477.8	2472.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b-INF	1		Si	1803	3100	0		1803	0	1500	1500		2477.8	2472.2	1460	230	2390	0	2390	0	1230	258	

(Continua)

X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO
FEI_T5.x	FEI_T5.x	FEI_T5.y	FEI_T5.y0	FEo_T5.x	FEo_T5.x	FEo_T5.y	FEo_T5.y0	FEI_T6.x	FEI_T6.x	FEI_T6.y	FEI_T6.y0	FEo_T6.x	FEo_T6.x	FEo_T6.y	FEo_T6.y0	FEo_T6.y	FEo_T6.y0
3379	1869	102	0	3384.6	1874.6	201	0	3194.7	1794.7	1610.3	1360.4	794.7	3162.9	1762.8	1610.3	1454.3	888.6
3379	1869	102	0	3384.6	1874.6	201	0	3194.7	1794.7	1610.3	1360.4	794.7	3162.9	1762.8	1610.3	1454.3	888.6
2771.7	1261.7	102	0	2777.3	1267.3	201	0	2631.6	1231.6	1610.3	1132.9	567.2	2599.8	1199.8	1610.3	1226.8	661.1
2777.3	1267.3	201	0	2771.7	1261.7	102	0	2599.8	1199.8	1610.3	1226.8	661.1	2631.6	1231.6	1610.3	1132.9	567.2
3384.6	1874.6	201	0	3379	1869	102	0	3162.9	1762.8	1610.3	1454.3	888.6	3194.7	1794.7	1610.3	1360.4	794.7
3384.6	1874.6	201	0	3379	1869	102	0	3162.9	1762.8	1610.3	1454.3	888.6	3194.7	1794.7	1610.3	1360.4	794.7

(b) <P/ T_TB>

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	
PAN_SW	N.	MD	CD	TB_T1.x	TB_T1.y	TB_T1.yo	TB_T2.x	TB_T2.y	TB_T2.yo	TB_1.H	TB_1.H	TB_2.H	TB_3.H	TB_4.H	TB_4.H2	TBlat_T7.x	TBlat_T7.y	TBlat_T7.yo	TBlat_T8.x	TBlat_T8.y	TBlat_T8.yo	TBo_H	TB_H	
PAN_SW_O: PAN_SW_O	10		Si	1169	2400	0	1500	1169	0															
PAN_SW_V: PAN_SW_V	4		Si	1169	2400	0	2790	1169	0								0	0	0	0	0	0	0	0
PAN_SW_V: PAN_SW_V-INF	6		Si	1169	2400	0	2790	1169	0							690	3100	0	1980	690	0	410	2280	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c	1		Si	1169	3100	0	1500	1169	0	3979.4	1489.4	3830.1	3680.8	3531.5	3382.2	0	0	0	0	0	0	0	0	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c-INF	1		Si	1169	3100	0	1500	1169	0	3979.4	1489.4	3830.1	3680.8	3531.5	3382.2	560	3100	0	2390	560	0	0		
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.d	2		Si	1169	3100	0	1500	1169	0	3372.1	882.1	3222.8	3073.5	2924.2	2774.9	0	0	0	0	0	0	0	0	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.a	2		Si	1169	3100	0	1500	1169	0	2783	293	2932.3	3081.6	2932.3	3081.6	0	0	0	0	0	0	0	0	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b	1		Si	1169	3100	0	1500	1169	0	3390.3	900.3	3539.6	3688.9	3539.6	3688.9	0	0	0	0	0	0	0	0	
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b-INF	1		Si	1169	3100	0	1500	1169	0	3390.3	900.3	3539.6	3688.9	3539.6	3688.9	560	3100	0	2390	560	0	0		

(c) <P/ C_FE>

A	B	C	D	E	F
PAN_SW	N.	MD	CD	FE_C1	FE_C2
PAN_SW_O: PAN_SW_O	10		Si	1599.5	104.5
PAN_SW_V: PAN_SW_V	4		Si	1599.5	104.5
PAN_SW_V: PAN_SW_V-INF	6		Si	1599.5	104.5
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c	1		Si	1599.5	104.5
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c-INF	1		Si	1599.5	104.5
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.d	2		Si	1599.5	104.5
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.a	2		Si	1599.5	104.5
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b	1		Si	1599.5	104.5
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b-INF	1		Si	1599.5	104.5

(d) <P/ C_TB>






















































































A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
PAN_SW	N.	MD	CD	TB_C1	TB_C2	TB_C3	TB_C4	TBlat_C1	TBlat_C2	TBlat_C3	TBlat_C4
PAN_SW_O: PAN_SW_O	10		Si	1077.5	713	526	367				
PAN_SW_V: PAN_SW_V	4		Si	713	713	526	367				
PAN_SW_V: PAN_SW_V-INF	6		Si	713	713	526	367	692.5	520.5	526	175.5
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c	1		Si	1077.5	713	526	367				
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.c-INF	1		Si	1077.5	713	526	367	582.5	455.5	288.5	175.5
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_DX.d	2		Si	1077.5	713	526	367				
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.a	2		Si	1077.5	713	526	367				
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b	1		Si	1077.5	713	526	367				
PAN_SW_VS: PAN_SW_VS_SX.b-INF	1		Si	1077.5	713	526	367	582.5	455.5	288.5	175.5

Fig.33 - Abachi di produzione: coordinate macchina per il taglio (a, b) e la cordonatura (c, d) dei fogli di cartone, suddivisi per fogli esterni (FE) e tubolari interni (TB) (Elaborazione da modello Autodesk® Revit, V. Appendici, "PRJ") (Credits: Elaborazione personale)

Rispetto alle attuali proposte ed esperienze sviluppate sul tema delle infrastrutture educative per l'emergenza (analizzate alla Pt. II, Cap. 3.3), l'unità scolastica CARES ha permesso di configurare un modello progettuale innovativo e virtuoso che risponde agli obiettivi di sostenibilità individuati, così come sintetizzato nel quadro sinottico della Tabella 15. In particolare, le intrinseche caratteristiche di leggerezza e manovrabilità della tecnologia di pannelli prefabbricati permettono di rispondere alle esigenze di rapidità e semplicità di installazione del manufatto. Al tempo stesso, sono garantite le possibilità di dismissione selettiva e riutilizzo/reinstallazione dei componenti edilizi, sostenendo in questo modo obiettivi di circolarità del sistema edilizio-costruttivo. Circolarità ulteriormente valorizzata dall'utilizzo di un materiale costruttivo, il cartone, che utilizza materie prime naturali e ad elevata eco-compatibilità del ciclo di vita. Il nuovo modello di organizzazione e gestione della produzione off-site dei componenti si applica al progetto dell'unità CARES rendendo il modello progettuale personalizzabile e adattabile secondo le istanze contestuali (condizioni climatiche, vincoli del sito, esigenze del programma funzionale, ecc.), promuovendo un approccio alla cu-

stomizzazione di massa del prodotto edilizio industrializzato. Per quanto attiene ai parametri di efficienza energetica, le prestazioni dei componenti edilizi prefigurano ampi margini di rispondenza agli stringenti standard normativi stabiliti dalla normativa CAM; tuttavia, tali aspetti saranno oggetto di approfondimenti e verifiche da sviluppare nella fase di post-doc, sia attraverso prove e simulazioni indirette che tramite monitoraggio in uso dell'unità.

Tab.15 - Quadro sinottico di comparazione tra il progetto dell'unità scolastica CARES rispetto allo stato dell'arte

Casi studio	Parole chiave				
					
	Semplicità e rapidità di esecuzione, anche con l'ausilio di manodopera non specializzata e mezzi ordinari	Reversibilità dell'intervento	Efficienza energetica	Utilizzo di materiali naturali, eco-compatibili e a ridotto impatto	Flessibilità e customizzabilità della soluzione architettonico-edilizia
01. Ampliamento del Campus Scolastico a Pontedera					
02. Scuola Secondaria di Secondo grado "Paladini e Civitali"					
03. Lavington ECO Classroom					
04. Sawley Junior School					
05. Waldorf Elementary School					
06. Energy-Positive Relocatable Classroom					
07. Perkins SEED Classroom					
08. Sprout Space					
09. Scuola Secondaria di Secondo Grado "M. Malpighi"					
10. Edificio scolastico temporaneo (EST) "Mantovani e Gonnelli"					
11. Gen7 Brentwood School					
12. Bertsch School Living Lab					
13. Harvard Yard Child Care Center					
14. Het4e Gymnasium					
15. Wesborough Primary School Carboard Building					
16. Unità scolastica CARES					

2.4. Ottimizzazione del consumo di materiale attraverso il modello BIM

Il modello di progetto predisposto in Autodesk® Revit è stato utilizzato, con riferimento al caso-studio dell'unità scolastica **CARES**, per valutare la riduzione del consumo di materiale ottenuta implementando il nuovo processo organizzativo (Fase 04.b). Una delle criticità emerse dalle fasi di analisi riguardava la mancanza di coordinazione tra le forniture dei fogli di cartone, che vengono acquistati in *batch* di dimensioni omogenee (2400 x 3100 mm) e le effettive richieste della produzione personalizzata. Attraverso il confronto diretto con gli operatori, è emerso che tale impostazione è conseguenza della mancanza di strumenti che permettano di avere un quadro sistemico dei diversi ordini, ovvero di avere sotto controllo le dimensioni e quantità esatte dei pezzi che devono essere prodotti. Per questo motivo, nell'organizzazione attuale risulta maggiormente conveniente, in termini di programmazione, rifornire il magazzino di prodotti standardizzati. A seconda delle configurazioni dei pannelli, i professionisti dell'area tecnica ottimizzano il quantitativo di fogli di cartone necessari alla produzione aggregando i pezzi, in diverse combinazioni, sul foglio di dimensioni standard, cercando di razionalizzare il materiale a disposizione. Per operare una scelta consapevole, le diverse opzioni devono essere comparate rispetto al consumo finale di materiale e il relativo costo, andando poi a selezionare la combinazione ottimale di pezzi-fogli di cartone. Si tratta di uno sforzo notevole di programmazione, che deve oltretutto avvenire a monte della produzione e in tempo utile affinché possano essere rispettate le tempistiche degli ordini, della consegna dei materiali e quelle di produzione. Inoltre, questo tipo di impostazione non tiene conto delle dimensioni effettive dei pezzi che è necessario produrre, esponendo tutta la produzione ad un elevato potenziale di spreco di risorse materiali.

Per correggere questo elemento di criticità, il nuovo modello di processo ha previsto l'implementazione di uno strumento digitalizzato che consentisse di automatizzare e velocizzare le operazioni di razionalizzazione del materiale, rispondendo all'obiettivo di ricerca di ottimizzare le risorse del processo edilizio e ridurre la produzione di rifiuti. Nello specifico, lo strumento sviluppato consiste di due abachi di computo dei materiali (C – CTO_FE e C – CTO_TB) predisposti all'interno del modello di progetto in Autodesk® Revit, che possono essere utilizzati dall'utente per testare e verificare diverse opzioni di consumo del materiale a partire dall'inserimento delle dimensioni dei fogli nelle prime due colonne dell'abaco (D-Md, D-Cd). Le dimensioni dei pezzi da produrre vengono calcolate ed elencate nello stesso abaco in modo da averne un quadro di insieme; sulla base delle dimensioni dei pezzi, l'utente può decidere le dimensioni dei fogli di cartone da utilizzare, inserendole nei campi di compilazione libera. Nella colonna di fianco, l'operatore seleziona inoltre, attraverso un comando di spunta, la direzione di inserimento dei fogli in macchina; tale informazione permette di stabilire, per le formule di calcolo successive, la dimensione massima utilizzabile per aggregare i pezzi nei fogli di cartone. Stabilite le condizioni in input, per ciascuna combinazione immessa dall'utente, l'abaco calcola il consumo di materiale, ovvero il numero di fogli e la superficie complessiva del cartone, che vengono visualizzati in un'apposita colonna impostata a valle (Fogli-CTO, Sup.CTO) (Tab.05, p.298). Il numero di fogli viene calcolato, per ciascuna tipologia di pannello, da una formula che opera un processo di *nesting* (Cfr. Fig.16, pp.296-297) ovvero aggrega più pezzi in un unico foglio fino alla dimensione massima disponibile di quest'ultimo, per ridurre lo spreco di materiale. Con questi passaggi, l'operatore ha a disposizione uno strumento di rapida consultazione delle opzioni di programmazione dell'ordine, che permette di comparare, valutare e selezionare la combinazione più efficace a ridurre il consumo e il costo del materiale.

9. Il costo unitario a m2 del materiale è stato calcolato sulla base dei dati forniti dall'azienda. Il costo di un foglio di cartone di dimensioni 2400 x 3100 mm (7.44 m2) è 2.12 €, che restituisce il costo unitario di 0.28 €/m2 usato a riferimento per il calcolo complessivo.

10. Per tutte le casistiche testate, si è considerato un rifilo del foglio di cartone di 20 mm, necessario per correggere eventuali difetti causati durante la fase di trasporto, manovra e stoccaggio.

La fase di verifica ha dunque inteso testare l'efficacia di questo strumento nell'ottimizzare il materiale, verificando le potenzialità di tale approccio nella riduzione del consumo di risorse, rispetto all'attuale impostazione organizzativa del magazzino. Sul piano metodologico, la fase di verifica è stata portata avanti attraverso una comparazione diretta dei dati estrapolati dal modello digitalizzato in ambiente BIM del caso-studio dell'unità scolastica **CARES**. La verifica ha messo a confronto 12 combinazioni di progressiva ottimizzazione delle dimensioni dei fogli – 6 combinazioni per fogli esterni e 6 per i tubolari interni –, di cui la prima corrispondente all'attuale strategia adottata dall'azienda (Combinazione FE/TB-01). Le casistiche testate sono state valutate e comparate sulla base del parametro del consumo di materiale (superficie di cartone in m²) e del relativo costo⁹. Le combinazioni dimensionali proposte tengono conto delle dimensioni effettive dei pezzi necessari alla produzione dei pannelli dell'unità scolastica **CARES**. A partire dalle dimensioni dei fogli usati attualmente, i valori inseriti sono stati progressivamente ridotti fino alle dimensioni strettamente necessarie per ricavare i pezzi di cartone per i fogli esterni e i tubolari interni al pannello¹⁰. Al fine di testare delle casistiche verosimilmente attuabili, le dimensioni dei fogli sono state aggregate in macro-categorie omogenee, ovvero ipotizzando di utilizzare al massimo due tipologie di fogli di cartone diverse. Tale scelta è stata valutata rispetto al fatto che le partite di materiale vengono ordinate dalle cartiere sulla base di macro-categorie di dimensioni, piuttosto che approntare ordini parcellizzati di poche unità per tipo.

Le combinazioni testate sono state selezionate anche con lo scopo di valutare gli effetti di specifiche scelte progettuali sul consumo finale di materiale. Per esempio, attraverso le combinazioni FE/TB-04-05-05, si è voluto testare se e in che modo l'abbassamento del giunto di separazione verticale dei pannelli, necessario per componenti con elevato sviluppo in altezza, avesse una conseguenza sulla diminuzione o incremento del consumo di materiale (Tabb.16-19), colonna (c)).

A fronte di queste premesse, le casistiche testate sono quelle riassunte dalle Tabelle 16-19, colonne (a)(b)(c)), rispettivamente per le configurazioni dei fogli esterni (FE) e per i fogli dei tubolari interni (TB). Per ciascuna combinazione, le tabelle riportano i dati calcolati automaticamente dal modello digitalizzato, rispetto alla superficie totale del cartone utilizzato (Tabb.16,17, colonna (d)), e il costo finale di acquisto del materiale (Tabb.16,17, colonna (e)).

Tab.16 - Combinazioni testate per il consumo di materiale dei fogli esterni (FE)

Combinazione (a)	Dimensioni foglio (L x H, mm) (b)		Altezza giunto (mm) (c)	Sup. totale cartone (m ²) (d)	Costo totale (€) (e)
FE-01	2400	3100	2790	624.96	178.08
FE-02	1900	3100	2790	494.76	140.98
FE-03	1900	3100	1500	600.78	171.19
FE-04	1900	3100+2500	1500	518.70	147.80
FE-05	1900	2800	2790	446.88	127.34
FE-06	1900	2800	1500	524.64	149.49

Tab.17 - Combinazioni testate per il consumo di materiale dei tubolari interni (TB)

Combinazione (a)	Dimensioni foglio (L x H, mm) (b)		Altezza giunto (mm) (c)	Sup. totale cartone (m ²) (d)	Costo totale (€) (e)
TB-01	2400	3100	2790	781.20	222.60
TB-02	1200	3100	2790	390.60	111.30
TB-03	1200	3100	1500	522.66	148.93
TB-04	1200	3100+2500	1500	489.18	139.39
TB-05	1200	2800	2790	352.80	100.53
TB-06	1200	2800	1500	472.08	134.52

La valutazione delle combinazioni richiede il solo aggiornamento dei dati dimensionali del foglio (Tabb.16,17, colonna (b)), rispetto al quale vengono calcolati automaticamente i consumi e i costi del materiale. Il modello non elabora una soluzione univoca, ma fornisce uno strumento di rapida interrogazione ed esplorazione di un numero pressoché illimitato di alternative progettuali, finalizzata ad ottenere una progressiva ottimizzazione del materiale di partenza. Dall'elaborazione dei risultati è possibile infatti notare come tutte le configurazioni ipotizzate, che si riferiscono al medesimo modello di unità scolastica, risultano migliorative rispetto alla strategia attuale. In tutti i casi è possibile ottenere una riduzione nell'uso del cartone, contribuendo in maniera significativa alla diminuzione degli sprechi di materiale. Le percentuali di ottimizzazione, calcolate come rapporto tra la superficie di cartone utilizzata nella combinazione FE/TB-“i” rispetto a quella attuale FE/TB-01 sono quelle riportate nelle Tabelle 8,19, colonna (f)).

Tab.18 - Percentuale di riduzione del consumo di materiale (f) per le combinazioni di fogli esterni (FE)

Combinazione (a)	Dimensioni foglio (L x H, mm) (b)		Altezza giunto (mm) (c)	Percentuale di riduzione del consumo di materiale (f)
FE-01	2400	3100	2790	---
FE-02	1900	3100	2790	20.83%
FE-03	1900	3100	1500	3.87%
FE-04	1900	3100+2500	1500	17.00%
FE-05	1900	2800	2790	28.49%
FE-06	1900	2800	1500	16.05%

Tab.19 - Percentuale di riduzione del consumo di materiale (f) per le combinazioni di tubolari interni (TB)

Combinazione (a)	Dimensioni foglio (L x H, mm) (b)		Altezza giunto (mm) (c)	Percentuale di riduzione del consumo di materiale (f)
TB-01	2400	3100	2790	---
TB-02	1200	3100	2790	50.00%
TB-03	1200	3100	1500	33.10%
TB-04	1200	3100+2500	1500	37.38%
TB-05	1200	2800	2790	54.84%
TB-06	1200	2800	1500	39.57%

Tra le diverse combinazioni simulate, quella che maggiormente ottimizza il consumo di cartone, sia nel caso dei fogli esterni che per i tubolari interni, è la combinazione **FE/TB-05**, che prevede rispettivamente l'utilizzo di fogli di dimensione 1900 x 2800 mm e 1200 x 2800 mm, con un'altezza del giunto di separazione – per i pannelli con altezza superiore a 2800 mm – di 2790 mm. Tale soluzione consente infatti di ottenere un risparmio, in termini di superficie di materiale consumata e di costo, del 28.49% per i fogli esterni e del 54.84% per i tubolari interni. Al contrario, le soluzioni che promuovono una minore razionalizzazione sono le combinazioni **FE/TB-03** (-3.87% e -33.10% sulla superficie richiesta nell'impostazione attuale) che, rispetto alla precedente, prevedono la sola variazione dell'abbassamento del giunto di separazione a 1500 mm. Questo avviene perché la formula che calcola il numero di fogli necessari è descritta con una istruzione condizionale che aggrega due o più pezzi in un unico foglio fino alla dimensione massima sfruttabile, assegnando automaticamente un +1 quando questa viene superata. In questo caso dunque, la suddivisione dei fogli in pezzi da 1500 mm di altezza, a cui sommare la dimensione variabile del pezzo superiore di completamento, richiede – a parità degli elementi da produrre – di utilizzare un numero di fogli maggiore rispetto alle configurazioni **FE/TB-05**, con un conseguente aumento dello sfrido di cartone. Il risultato ottenuto dalla comparazione di queste due configurazioni, ovvero quelle con la minore e maggiore percentuale di ottimizzazione del materiale, risulta significativo per comprendere come la variazione di anche un solo parametro di progetto può rappresentare, nell'ottica di gestione di tutto il processo edilizio, un elemento di forte condizionamento in un'ottica globale di utilizzo delle risorse, difficilmente controllabile attraverso una gestione *CAD-based* delle operazioni di computo e verifica. In questa ottica, le potenzialità del calcolo digitalizzato consistono nell'avere a disposizione un immediato feedback per la valutazione e selezione delle migliori alternative progettuali e delle scelte organizzative della produzione in ottica di riduzione dell'impatto del processo edilizio.

A partire dai risultati ottenuti è stato possibile innanzi tutto confermare il raggiungimento dell'obiettivo di ottimizzazione delle risorse e riduzione della produzione di rifiuti. In previsione della realizzazione dell'unità scolastica **CARES**, attraverso gli strumenti digitalizzati e un cambiamento nell'approccio organizzativo alla produzione in ottica *lean*, è stato possibile individuare una soluzione per l'approvvigionamento del materiale (combinazione **FE/TB-05**) che consente di ridurre il consumo di materiale complessivamente del 83.33% rispetto a quello che si sarebbe avuto con l'impostazione tradizionale del lavoro, ovvero producendo i componenti con il tipo di fogli normalmente acquistati dall'azienda. In secondo luogo, e in virtù dei dati ottenuti, è stato possibile confermare l'efficacia dell'algoritmo che aggrega e ottimizza i pezzi da produrre rispetto alle dimensioni disponibili del foglio di cartone, ovvero validare preliminarmente lo strumento come supporto decisionale per le fasi di pre-produzione.

2.4. Confronto e intervista con i destinatari del modello di processo sviluppato

La fase conclusiva della ricerca (Fase 04.c) ha previsto un momento di confronto diretto con gli operatori aziendali, ovvero con i destinatari privilegiati del nuovo modello di processo, che hanno operativamente adottato gli strumenti proposti contestualmente allo sviluppo del progetto dell'unità scolastica **CARES**. Nello specifico, tale confronto è avvenuto nell'ambito di una intervista ai due responsabili delle aree tecnica e commerciale di AREA S.r.l., rispettivamente l'Ing. PhD Dario Luigi Distefano e l'Ing. Nicola Timpanaro, svolta successivamente alla conclusione delle attività di implementazione del processo in azienda. L'obiettivo del confronto è stato quello di acquisire una valutazione preliminare, nella forma di feedback qualitativi, circa il livello di efficientamento del processo e il miglioramento apportato rispetto al flusso di lavoro precedente. Per questo motivo, l'intervista è stata strutturata secondo una serie di domande che coprono i diversi ambiti del progetto e produzione dei componenti prefabbricati e dei quali è stata prevista l'ottimizzazione in accordo agli obiettivi di ricerca. Il confronto con gli operatori aziendali è stato inteso come una prima verifica dell'efficacia dei prodotti di ricerca, e particolarmente di quelli che coinvolgono gli aspetti qualitativi del processo edilizio, come il miglioramento della capacità di controllo, il potenziamento della coordinazione, le implicazioni operative ed economiche sottese al nuovo flusso di lavoro. Le domande sottoposte agli operatori, in una fase successiva della ricerca, potranno essere strutturate nella forma di una valutazione qualitativa comparata; selezionando un campione di aziende del settore della produzione edilizia disposte ad implementare le medesime strategie di digitalizzazione, sarà infatti possibile sottoporre agli operatori un questionario che copra gli aspetti di efficientamento per verificare qualitativamente il modello di processo sviluppato (Cfr. **Pt. III, Cap. 3**).

Di seguito vengono riportati gli esiti dell'intervista.

Elisa Belardi (EB): Il lavoro di ricerca portato avanti negli ultimi mesi ha previsto l'implementazione di un modello organizzativo della produzione improntato ai principi dell'Industria 4.0, in particolare transizione digitale e informatizzazione del prodotto-processo edilizio. Quali sono le principali motivazioni che hanno spinto la vostra azienda a intraprendere un percorso di trasformazione in questa direzione, anche rispetto ai contenuti della programmazione comunitaria e nazionale (Horizon Europe, PNRR)?

Dario Luigi Distefano (DD): *La nostra, relativamente giovane, realtà aziendale nasce esattamente con vocazione ai processi di trasformazione e cambiamento. La nostra mission è dare risposta alle nuove esigenze di trasformazione degli ambienti di vita, di lavoro, di studio con pareti, rivestimenti e strutture sempre orientate alle esigenze attuali ma che, con spiccata flessibilità, possano adattarsi al cambiamento delle stesse senza produrre rifiuto. Per ottenere ciò il nostro processo di progettazione-produzione segue gli indirizzi della standard customization, ovvero la capacità di realizzare oggetti diversi in misure, finiture, configurazioni ma accomunati dallo stesso schema funzionale e produttivo. La standard customization trova compimento in fabbriche leggere, ovvero fabbriche che operano affiancano il controllo numerico alla sapienza artigiana. Crediamo che il futuro della grande fabbrica artigiana sia proprio questo, la trasformazione in fabbrica leggera per la produzione di oggetti unici con la qualità e la certezza di un processo controllato. Per Archicart la trasformazione in fabbrica leggera è stata una scelta d'indirizzo compiuta già dal momento in cui è risultata chiara la mission aziendale, accompagnata da una tecnologia innovativa. Il cuore del nostro processo produttivo è operare tagli e piegature (cordonature) in fogli di cartone ondulato. Queste due operazioni, con le loro regole e le loro tolleranze, sono state dapprima trasferite ad una macchina a controllo manuale di nostra produzione ed oggi ad una macchina a controllo numerico, anche questa di*

nostra produzione, nella quale il codice di elaborazione usa la stessa logica dei nostri artigiani, traducendo la loro esperienza di produzione in sequenze di macro molto accurate. Questa è la fabbrica leggera di Archicart.

Nicola Timpanaro (NT): *Digitalizzazione e innovazione dei processi rappresentano la prima missione del NGEU e l'Italia, in particolare, intende recuperare il distacco da altri paesi europei in termini di produttività. Per noi, tuttavia, non significa soltanto aumentare la competitività, per lo meno non prettamente in termini di capacità produttiva. L'obiettivo di Archicart è stato quello di puntare a una tecnologia costruttiva che si spostasse quanto possibile all'interno della fabbrica, convinti che questo passo sia fondamentale per trasferire anche al settore dell'edilizia aspetti già ordinari in altri settori; e gli aspetti sono precisione e dettaglio del prodotto, sicurezza dei lavoratori, riduzione degli sprechi. La produttività intesa come volumi rappresenta poi un ulteriore vantaggio, ma non il principale motore del progetto. In quest'ottica, un prodotto che deve idearsi e realizzarsi in fabbrica, ha bisogno di una fabbrica "intelligente" che permetta il raggiungimento di quegli obiettivi di sicurezza, precisione e ottimizzazione.*

EB: Contestualmente allo sviluppo del progetto dell'unità scolastica per la Scuola "J. Piaget" di Altarello, avete avuto modo di sperimentare l'adozione di un nuovo flusso di lavoro, operativamente basato sull'utilizzo di strumenti BIM per la gestione del progetto e l'organizzazione delle fasi di produzione. Quali sono stati i principali cambiamenti di approccio richiesti dall'adozione del nuovo workflow?

DD: *Il grande vantaggio di avere un processo di produzione standardizzato risiede proprio nella possibilità di ridurre la quantità di informazioni che compongo il progetto in una stringa di valori trasferibili alla macchina. Questo passaggio risulta molto complesso da gestire con strumenti di progettazione CAD non orientati all'oggetto perché si affida al disegnatore l'intero progetto, a partire dal concept architettonico, per arrivare agli esecutivi di officina. La precisione e il controllo degli errori sono totalmente frutto delle capacità del disegnatore e della sua conoscenza della materia.*

La naturale evoluzione della parte progettuale del processo produttivo di una fabbrica leggera è la progettazione parametrica con strumenti BIM. Questi differiscono in modo sostanziale dai tradizionali strumenti CAD. Gli oggetti progettati in BIM hanno la duplice natura di elemento grafico e informazione (parametro). Il progettista si occupa della sola parte architettonica del progetto, utilizzando famiglie di componenti parete compiutamente definite e già dotate di output esecutivi parametrizzati. Il processo è estremamente semplificato, velocizzato e preciso. La progettazione parametrica BIM dell'unità scolastica per la Scuola "J. Piaget" di Altarello ha ridotto i tempi di realizzazione degli esecutivi del 75% e ha ridotto il rischio di errore del 100% sulla parte esecutiva. L'altro aspetto fondamentale è la flessibilità offerta dallo strumento che permette di modificare, aggiornare o rifare il progetto architettonico senza dover ripercorrere la fase esecutiva del progetto.

NT: *Siamo ancora in fase sperimentale. Aver ripensato il progetto per la Scuola a partire da un database di prodotto ci ha spinti a ripetere questo lavoro con tutti gli altri prodotti Archicart che non saranno più l'insieme di linee e annotazioni puntuali, ma la combinazione di variabili predefinite. Di più, questo approccio si allarga dalla fase progettuale alle altre fasi: commerciale, acquisti, confezionamento e installazione.*

EB: Quali sono state le principali ricadute prodotte dall'adozione del nuovo processo, nei diversi ambiti della progettazione e dell'organizzazione della produzione? Quali prevedete saranno gli effetti a lungo termine derivanti dalle nuove modalità di lavoro?

DD: *Il vantaggio immediato è l'estrema riduzione dello stress lavoro correlato. I reparti erano prima interdipendenti e l'errore di uno aveva ripercussioni sul lavoro dell'altro. Il nuovo processo permette di ridurre sensibilmente la quantità di decisioni dell'operatore che condizionano il lavoro di un altro e quindi permette di concentrare le proprie risorse su un numero ridotto di mansioni, aumentando il livello di attenzione.*

Gli effetti a lungo termine sono legati alla specificazione delle competenze degli operatori dei diversi reparti che permetterà di raggiungere alti livelli di qualità del prodotto senza compromessi con la quantità prevista dalla pianificazione. Il grande vantaggio dello sviluppo industriale interno all'azienda permetterà poi di poter aggiornare il processo e i suoi codici grazie ai feedback ricevuti dagli operatori specializzati dei diversi reparti.

NT: *Siamo convinti che il successo di Archicart passi per la capacità di proporre una soluzione totalmente fabbricata in officina, ma pure su misura. Il principio è quello della Standardized Customization, che però nel mondo delle Pareti non può ridursi all'assemblaggio di componenti standard che combinati offrono più opzioni dello stesso prodotto. Questo approccio, già utilizzato da altri produttori di pareti modulari, ci pare non sia riuscito a rispondere appieno alle problematiche che si presentano tipicamente nella trasformazione degli spazi o alle esigenze abitative. Gli strumenti BIM e il nuovo approccio ci hanno mostrato come sia possibile puntare a questo importante obiettivo, concentrandosi sul processo produttivo più che sui componenti, considerando le misure di progetto come parametri alla stregua dei componenti da ordinare, lavorare e assemblare.*

Saremo in grado di offrire tanti oggetti unici, presentati con la semplicità di un prodotto da catalogo, ma realizzati con la cura di un prodotto di artigianato.

EB: Ritenete che le competenze pregresse siano state sufficienti per utilizzare gli strumenti BIM implementati? Quali sono state le principali problematiche riscontrate nell'integrare i nuovi approcci e/o strumenti nel flusso di lavoro?

DD: *Ritengo che non solo le competenze pregresse siano state sufficienti per l'adozione degli strumenti BIM ma che siano state le progenitrici del loro linguaggio esitato nel codice implementato.*

Nell'ambito della produzione di oggetti innovativi, la conoscenza della materia e la sapienza della sua modellazione svolgono un ruolo cruciale nella definizione di strumenti e processi che pertanto risultano essere i risultati attesi dell'evoluzione dei vecchi processi, con gli stessi principi e le stesse logiche, semplicemente rese più veloci e sicure.

NT: *Credo che il principale ostacolo da superare sia quello tipico di ogni trasformazione che si rispetti. Bisogna sostituire uno strumento/software conosciuto e in uso, che però ti costringe dentro un approccio inefficace, con uno strumento nuovo, da conoscere e in un primo momento ancora inutilizzabile, che però al contrario ti porta naturalmente verso il nuovo approccio. Le conoscenze pregresse da parte del nostro gruppo di lavoro vanno sicuramente implementate e la difficoltà sta nel fatto che si deve affrontare questo processo mentre allo stesso tempo l'attività dell'azienda va avanti.*

EB: La transizione digitale riguarderà in futuro la gestione dei diversi aspetti del ciclo di vita delle opere, sui quali potrà essere scalato il modello di processo sviluppato: approvvigionamento dei materiali, progetto e verifica, produzione e messa in opera dei componenti, dismissione e gestione delle risorse a fine vita. Da un punto di vista operativo, quali ritenete siano i principali limiti e/o fattori di criticità legati all'implementazione di tale tipo di approccio?

DD: *Il rischio che si corre quando la transizione digitale viene perseguita come una corsa alla digitalizzazione è la rarefazione dell'ingegno e della creatività degli operatori che si troveranno a dialogare con i nuovi strumenti. Una corsa alla digitalizzazione potrebbe restituire, infatti, processi e strumenti che, per velocità di elaborazione, non tengano in considerazione le specificità artigianali dei precedenti, riducendo la possibilità dei maestri di operare scelte e ledendo di fatto la natura artigianale dell'opera realizzata. Un processo di transizione digitale virtuoso, al contrario, non può essere veloce. Esso deve essere il frutto dell'incontro tra engineering e handcraft in un sapiente connubio delle reciproche specificità.*

NT: *Guardiamo al passo che stiamo realizzando adesso. Stiamo applicando questo approccio alla composizione nostri prodotti, oggetti dei quali conosciamo quasi tutto e che facilmente riusciamo a studiare e manipolare per estrarre le informazioni utili alla loro nuova definizione.*

Mi aspetto che le difficoltà maggiori nel riportare questo approccio all'esterno risiedano nel reperimento delle informazioni. La raccolta dei dati, e poi il monitoraggio e la loro analisi rappresentano il tassello fondamentale per trasferire il nuovo approccio a tutto il ciclo di vita delle soluzioni che offriamo.

WHAT'S

NEXT?

III.3 Implicazioni scientifiche, limiti e sviluppi futuri della ricerca

La tabella di marcia della programmazione europea si sta rapidamente dirigendo verso l'affermazione di un modello di sviluppo socio-economico *green*, competitivo e resiliente nei confronti dei cambiamenti ecosistemici che, seppur già manifestati da alcuni anni, si sono acuiti repentinamente a seguito della crisi sanitaria legata al Covid-19. Le filiere del settore delle costruzioni rappresentano uno snodo critico nell'attuazione delle *vision* per il prossimo futuro, ed assunto il ruolo di motore trainante della transizione ecologica comunitaria. Per il comparto AEC, l'imperativo è quello di *innovare* i prodotti e processi edilizi come sinonimo di ripensare radicalmente i modelli di filiera tradizionali, che risultano fortemente energivori e inquinanti, frammentati in un elevato numero di realtà medio-piccole e di attori eterogenei tra i quali i flussi informativi risultano attualmente intermittenti e fallaci. La disponibilità di nuove tecnologie informatizzate, che permettono di virtualizzare la gestione del ciclo di vita delle opere (Life-cycle Management), promuove una maggiore governabilità dei processi edilizi, sia durante la progettazione che la produzione industriale dei componenti, aggregando attori e competenze in un percorso integrato, efficiente e sostenibile. Ciononostante, il settore AEC dimostra attualmente una certa inerzia nel recepire tali input di cambiamento. Le motivazioni sono da ricercare, in prima istanza, nei rilevanti costi di sviluppo delle KETs all'interno dei processi aziendali, talvolta insostenibili per le PMI (ANCE, 2019). In secondo luogo, in una difficoltà, da parte dei *decision-makers*, nel comprendere appieno la portata e i benefici della trasformazione digitale, anche in considerazione della attuale mancanza di indicatori quantitativi che ne informino le scelte strategiche. In ultimo, molte delle realtà che sarebbero interessate a intraprendere un percorso di innovazione attraverso il digitale sono insicure rispetto agli investimenti da fare e su quali tecnologie, mancando delle competenze interne necessarie a valutare quali strumenti meglio rispondono ai propri obiettivi di sviluppo.

La ricerca si è inserita in questo dibattito inquadrando gli attuali temi di innovazione digitale nell'ambito delle realtà di produzione edilizia industrializzata di tecnologie costruttive prefabbricate. I risultati ottenuti dimostrano come, per le aziende del comparto di produzione edile, l'attivazione di percorso di trasformazione digitale consente di efficientare i processi edilizi, supportando obiettivi di circolarità, qualità del sistema costruito, sviluppo e crescita economica sostenibile. Il lavoro è stato portato avanti attraverso una costante collaborazione con un'azienda del settore della prefabbricazione che opera sul territorio nazionale, testimoniando come l'intersectorialità un approccio imprescindibile per intraprendere sperimentazioni orientate all'innovazione e al trasferimento tecnologico. Operativamente, la proposta di ricerca ha sviluppato un modello di processo integrato e digitalizzato per la gestione del prodotto-processo edilizio di una tecnologia di prefabbricazione in cartone. A partire da strumenti ampiamente disponibili come le piattaforme BIM, la ricerca ne ha ampliato l'applicabilità per avviare un processo di industrializzazione 4.0

della produzione dei pannelli, orientato alla razionalizzazione delle risorse, alla riduzione dei rifiuti e alla qualità e customizzazione del prodotto edilizio. I modelli di produzione a cui si guarda sono quelli che integrano i principi della *green* e *circular economy*, ovvero filiere di prodotto ad elevata eco-compatibilità, ridotte emissioni, che tendono alla valorizzazione delle risorse materiali per ridurne lo sfruttamento intensivo. Obiettivi a cui l'intera filiera delle costruzioni è chiamata a rispondere in recepimento degli indirizzi di programmazione internazionale e nazionale (SDGs, NEXT-EU, PNRR).

I contenuti di innovazione sperimentati nel campo dei sistemi di produzione industrializzata sono stati trasferiti e testati nella formulazione di una proposta di un modello virtuoso di infrastruttura emergenziale per l'educazione. Un settore in cui purtroppo non si è ancora riconosciuta la corrispondenza tra il *valore* della funzione educativa e il *valore* architettonico-edilizio delle infrastrutture destinate ad accogliere tale funzione, soprattutto nell'emergenza. Ciononostante, si tratta di un ambito di intervento che oggi, in vista degli ingenti finanziamenti per il potenziamento del patrimonio edilizio scolastico, e alla luce della crescente attenzione ai temi di sostenibilità dell'edilizia pubblica, presenta interessanti potenzialità per accogliere prodotti di ricerca innovativi, contribuendo per il settore privato all'attivazione di nuovi segmenti di mercato e possibilità di crescita. Su questo tema, il contributo della ricerca è consistito nel dimostrare come, attraverso l'innovazione tecnologica dei sistemi di produzione industrializzata, sia possibile rendere disponibili schemi di risposta profondamente diversi rispetto a quelli del passato, basati sui paradigmi della qualità costruttiva, della circolarità delle risorse e della sostenibilità del ciclo di vita degli interventi. Nell'ambito della proposta progettuale, la ricerca ha promosso una riflessione critica circa la necessità di ripensare, da parte dei *decision makers*, i livelli qualitativi attribuiti alle infrastrutture scolastiche per l'emergenza, sulla base di tre principali considerazioni. In primo luogo, perché il valore che si attribuisce ad una scuola, seppur provvisoria, è il valore che destiniamo all'educazione delle nostre future generazioni. In secondo luogo, perché anche attraverso l'architettura è possibile allenare ad una visione di lungo periodo, calibrando le nostre scelte attuali rispetto alle ricadute che avranno nel prossimo futuro. In ultimo, perché i *costi ambientali* di talune scelte superano nettamente gli investimenti necessari a selezionare opzioni maggiormente sostenibili, un aspetto che solo recentemente è stato introdotto nella valutazione delle offerte nelle gare pubbliche attraverso la richiesta di una valutazione di impatto LCC (Direttiva 2014/24/EU). Lo sviluppo della proposta progettuale nella seconda parte della ricerca è stato dunque guidato da una visione dell'intervento in emergenza che attribuisce valore a scelte ambientalmente consapevoli, immaginando un modello di infrastrutturazione scolastica sostenibile e reversibile, che instaura rapporti di minimo impatto con il contesto ambientale e sociale in cui si inseriscono. Per rispondere a tali obiettivi, la proposta progettuale ha sfruttato e potenziato le intrinseche caratteristiche di sostenibilità di una tecnologia costruttiva leggera, reversibile, basata su un materiale eco-compatibile e circolare come il cartone. Un sistema che ottimamente risponde alle necessità di rapido

assemblaggio, disassemblaggio dei manufatti e reversibilità degli interventi, manifestando una particolare attenzione al rapporto tra gli insediamenti emergenziali e il contesto in cui si inseriscono. Il modello di infrastruttura scolastica che si è immaginato è un manufatto assemblato per assolvere a specifiche esigenze della comunità, in grado, una volta esaurita la sua utilità di breve o medio periodo, di essere reimmesso nel flusso ciclico dei materiali per creare nuovo valore. In questa prospettiva, i risultati della ricerca prefigurano una duplice innovazione:

- Quella di processo, che attiene all'industrializzazione *smart* della produzione dei componenti del sistema, ovvero una produzione ottimizzata nell'uso delle risorse, altamente qualitativa, flessibile e integrata attraverso l'automazione.
- Quella di prodotto, che riguarda la proposta progettuale di un manufatto emergenziale sostenibile, circolare, adattabile, configurabile digitalmente e reversibile, che ridefinisce le implicazioni del progetto emergenziale dandone una "interpretazione ambientalmente compatibile" (Zanelli, 2006, p. 8);

Proprio per la sua natura sperimentale, durante lo svolgimento della ricerca si sono progressivamente manifestati una serie di limiti e criticità, di natura teorica e tecnico-operativa, che in positivo permettono però di individuare gli input per guidare le successive fasi di approfondimento. In primis, l'attuale difficoltà di interconnessione tra gli strumenti di progetto-simulazione-verifica (interoperabilità BIM-BEM), che non ha ancora raggiunto una piena maturità per quanto riguarda gli strumenti e le tecnologie digitali attualmente disponibili. Ciò non ha permesso di implementare il nuovo modello di processo nella sua interezza, ovvero non ha consentito di sviluppare gli aspetti simulativi delle prestazioni del caso-studio dell'unità scolastica **CARES** a partire dal modello digitalizzato del progetto. A questo proposito, la ricerca si è limitata ad individuare quali, tra gli strumenti che assicurano la compatibilità con il modello BIM, potranno essere integrati per le verifiche prestazionali, rimandando ad indagini successive la verifica e validazione del modello di processo nella sua interezza. In secondo luogo, un altro limite deriva dal considerare che l'adozione del nuovo processo è stata portata avanti per un tempo non sufficientemente prolungato affinché si potessero acquisire i dati necessari a misurare, sul lungo periodo, il livello di innovazione introdotto. Rimane dunque aperta la domanda per la raccolta e comparazione di indicatori quantitativi per verificare l'efficacia delle soluzioni proposte, così come per individuare elementi di criticità da risolvere per ottimizzare ulteriormente il processo. In questa prospettiva si ritiene necessario, affinché si possano compiutamente valutare i benefici apportati, che il modello di processo venga esteso alla totalità della produzione aziendale e che venga testato per un tempo successivamente prolungato (almeno 12 mesi), al termine del quale potranno essere confrontati i dati nelle fasi ante e post implementazione.

Infine, una delle fasi che dovrà essere completata è quella che riguarda la produzione di un primo prototipo di pannello in cartone impiegando i nuovi strumenti e macchinari automatizzati. Tale fase risulta indispensabile per confermare, ed eventualmente correggere, la

possibilità e le modalità di trasferimento diretto dei dati dal modello digitalizzato in BIM al software di controllo del macchinario, passaggio che ad oggi è stato solo pre-validato dalle competenze tecniche che si sono occupate della programmazione software della macchina.

I limiti individuati potranno essere risolti e superati scalando i prodotti di ricerca attuali, ovvero sviluppando una serie di approfondimenti ed azioni successive nella fase di post-doc. In particolare, le linee di ricerca che si intende portare avanti in futuro sono:

- Rispetto al modello di progetto elaborato in BIM, si intendono sviluppare gli aspetti di interconnessione con gli strumenti di simulazione energetica, strutturale, acustica e di calcolo dell'impatto LCA/LCC della tecnologia. Tale fase potrà avvenire attraverso il caso-studio già avviato, ovvero l'unità scolastica **CARES**, e prevedendo il coinvolgimento di esperti del settore per approfondire le problematiche tecnico-operative connesse con il Building Performance Simulation (BPS). Il duplice obiettivo è quello di formulare un approccio metodologico integrato che consenta, a partire da un unico ambiente di condivisione dati, di gestire la complessità delle variabili in gioco, e in secondo luogo di acquisire gli indicatori quantitativi di confronto delle prestazioni della tecnologia in cartone rispetto alle altre disponibili sul mercato, elemento funzionale a formulare una proposta coerente con la normativa per gli appalti pubblici;
- Per quanto riguarda il processo aziendale, si intendono acquisire e comparare opportuni indicatori quantitativi per la misurazione del livello di ottimizzazione raggiunto. Tra i parametri da misurare vi sono i tempi, i costi e il fabbisogno energetico della produzione, da valutare nelle due fasi di pre e post-implementazione del processo digitalizzato. L'acquisizione dei dati dovrà essere effettuata a valle della digitalizzazione dell'intero processo di progettazione e produzione, estendendo perciò il nuovo *workflow* a tutti i componenti prodotti dall'azienda (digitalizzazione in BIM delle diverse tipologie di pannelli¹). I dati dovranno essere acquisiti progressivamente per un periodo di sperimentazione di almeno 12 mesi, e successivamente potranno essere comparati rispetto a quelli del modello di gestione tradizionale della fabbrica. La riduzione del fabbisogno energetico potrà essere valutata sulla base dei dati reperiti dalle bollette energetiche corrispondenti allo stato pre e post-adozione del sistema gestionale digitalizzato;
- Correzione e ottimizzazione del modello BIM in funzione dei dati di produzione acquisiti dal macchinario a controllo numerico utilizzato in azienda, aggiornando la scrittura dei parametri che regolano l'esecuzione delle lavorazioni e il calcolo dei quantitativi di materiale richiesto;
- Produzione di uno o più prototipi di pannelli prefabbricati attraverso il nuovo sistema digitalizzato, in modo da verificare e progressivamente perfezionare gli strumenti che regolano il trasferimento dei dati *file-to-factory* dal modello in BIM del progetto al macchinario di taglio e cordonatura;
- Realizzazione e installazione del primo prototipo in scala dell'unità scolastica **CARES** e successivo monitoraggio (12 mesi), durante il quale potranno essere acquisiti i dati per

1. Pannelli di partizione interna, pareti mobili, contropareti e controsoffitti.

- la valutazione delle prestazioni energetico-ambientali e di comfort *indoor*;
- Sviluppo di un applicativo digitale *ad hoc* come un configuratore con un'interfaccia maggiormente *user-friendly* che permetta all'utente (tecnici aziendali o progettisti esterni) di aggregare i componenti del sistema costruttivo, simulandone le prestazioni e verificando le variabili di progetto, con la possibilità di trasferire tali informazioni alla realtà produttiva nell'ottica di ottimizzare le fasi realizzative e gestionali del processo edilizio dell'unità emergenziale;
 - Valutare la possibilità di estendere la digitalizzazione e automazione di processo ai diversi aspetti gestionali del ciclo edilizio, ovvero sviluppare compiutamente le sette dimensioni del BIM per estendere il modello anche alle fasi di pre-produzione, cantiere-rizzazione, uso e gestione degli edifici, dismissione e gestione del fine vita. In questa prospettiva risulta particolarmente interessante l'attivazione di un modello improntato al *download design* per la dislocazione della produzione, ovvero prevedere di riprodurre il *workflow* di processo svincolando le fasi di progetto e fabbricazione per avvicinarle ai luoghi di intervento. Questo richiederà anche la connessione con cataloghi e librerie *open source* per l'approvvigionamento dei materiali e dei componenti costruttivi, in modo da sviluppare un vero e proprio "magazzino virtuale di risorse" (Bologna e Terpolilli, 2005, p. 18) per digitalizzare i processi di *supply-chain management*, ovvero una piattaforma integrabile, trasferibile ad altri contesti e scalabile, per ricercare fornitori locali e soluzioni costruttive innovative. Un ulteriore campo di approfondimento è quello che riguarda la compatibilità del cantiere con la robotica avanzata, elemento che consentirebbe di incrementare ulteriormente il controllo sulla qualità del prodotto finale durante le fasi di messa in opera.

Un riferimento in questa direzione è quello di SY4.0, un progetto toscano sviluppato nel 2017 tra il Dipartimento DIDA dell'Università di Firenze, centri di ricerca del territorio e aziende del settore delle costruzioni, attraverso un finanziamento dei Fondi POR-FESR 2014-2020. Il progetto ha previsto infatti la trasformazione del cantiere edile attraverso l'adozione di un modello organizzativo improntato alle logiche di Industria 4.0, sfruttando dispositivi mobili per interconnettere e scambiare informazioni tra le maestranze e i macchinari, per incrementare la sicurezza, la rapidità e la prevedibilità del cantiere (ARL Arredoline Costruzioni, n.d.).

Parallelamente alle azioni che verranno sviluppate per correggere i limiti e colmare le domande rimaste aperte, la ricerca in fase post-doc prevede anche di scalare e trasferire i prodotti ottenuti ad altre realtà produttive, con l'obiettivo di verificarne e validarne l'efficacia. Sempre più spesso infatti le aziende del settore della prefabbricazione, e in particolare le PMI, sono alla ricerca di strumenti e metodologie sistematiche da adottare per la riconfigurazione dei loro processi in chiave digitale, riconoscendo in tale trasformazione lo strumento prioritario per il mantenimento della competitività nei nuovi mercati basati sulla *green economy*. In questa prospettiva, le due proposte metodologica e opera-

tiva della ricerca, risultano facilmente adattabili e trasferibili ai processi produttivi di altre tecnologie costruttive grazie alla riprogrammabilità del *workflow* e alla ormai sempre più ampia diffusione delle piattaforme BIM. Ciò a fronte di costi di investimento contenuti e di una specializzazione delle competenze compatibile con i profili professionali già interni alle aziende. Questa ulteriore fase di sviluppo prevederà il coinvolgimento di aziende che operano, nel territorio nazionale e all'estero, nel settore della produzione di componenti edilizi prefabbricati, tra cui l'azienda AREA S.r.l. che ha collaborato alla ricerca. A valle dell'implementazione del modello di processo nelle logiche organizzative e produttive delle aziende selezionate come casi-studio, sarà prevista una fase di valutazione qualitativa del livello di ottimizzazione ed efficientamento raggiunto. Tale passaggio sarà sviluppato attraverso la somministrazione di un questionario alle aziende coinvolte, finalizzato ad acquisire una valutazione circa gli effetti derivanti dall'adozione del nuovo processo/strumenti. Nella prospettiva di avviare tale valutazione, a completamento dei risultati sono state predisposte le domande del questionario che dovrà essere sottoposto alle aziende coinvolte, che dovrà essere somministrato in particolare ai professionisti esperti e diretti destinatari/utilizzatori degli strumenti digitalizzati che verranno introdotti, come i responsabili delle aree tecniche e commerciali, gli addetti alla produzione e alla gestione degli ordini. L'acquisizione delle risposte prevede due fasi di somministrazione del questionario, che avverrà sia prima che dopo l'implementazione del nuovo processo. Tale sequenzialità risulta necessaria a valutare l'incremento dell'efficienza del processo rispetto alle logiche precedentemente in uso, attraverso la richiesta di esprimere un giudizio su una scala crescente. Le domande, sintetizzate nella Tabella 18, esplorano le diverse aree e aspetti di efficientamento del processo di progettazione e produzione industrializzata su cui agisce la digitalizzazione, e consentiranno di estrapolare una serie di indicatori qualitativi funzionali a validare il modello di processo sviluppato con la ricerca.

Tab.18 - Questionario da somministrare agli operatori aziendali per la valutazione ante e post implementazione del modello di processo sviluppato

Controllo del processo edilizio				
D.01	In fase di progetto, è richiesto di effettuare una comparazione tra diverse alternative rispetto alla loro fattibilità tecnica, aspetto architettonico, costi e tempi di realizzazione. Come giudica l'impegno di tempo richiesto per sviluppare tale attività?			
1 <i>Estremamente onerose</i>	2 <i>Onerose</i>	3 <i>Abbastanza onerose</i>	4 <i>Poco onerose</i>	5 <i>Per nulla onerose</i>
D.02	Con quale frequenza ritiene si verifichino errori e/o incongruenze tra le caratteristiche del prodotto progettato e quello effettivamente realizzato?			
1 <i>Molto probabile</i>	2 <i>Probabile</i>	3 <i>Abbastanza raro</i>	4 <i>Raro</i>	5 <i>Nulla</i>
D.03	Come giudica la capacità di controllare e organizzare gli aspetti di produzione come: consistenza del magazzino, catalogazione dei pezzi in fase di produzione, stato di avanzamento della catena produttiva?			
1 <i>Estremamente difficoltosa</i>	2 <i>Difficoltosa</i>	3 <i>Abbastanza semplice</i>	4 <i>Semplice</i>	5 <i>Estremamente semplice</i>
Flessibilità e personalizzabilità dei prodotti				
D.04	Rispetto al costo finale di un prodotto, quanto incide il servizio di customizzazione (dimensioni, morfologia degli elementi, finiture, prestazioni termiche, ecc.)?			
1 <i>> +50%</i>	2 <i>+50-30%</i>	3 <i>+10-30%</i>	4 <i>< +10%</i>	5 <i>Nessuna variazione</i>
D.05	Rispetto ad un prodotto standardizzato, quanto tempo richiede la customizzazione (dimensioni, morfologia degli elementi, finiture, prestazioni termiche, ecc.)?			
1 <i>> +50%</i>	2 <i>+50-30%</i>	3 <i>+10-30%</i>	4 <i>< +10%</i>	5 <i>Nessuna variazione</i>
Coordinazione all'interno del processo				
D.06	Come giudica il livello di coordinazione e integrazione dei diversi aspetti della progettazione, ovvero la capacità di scambio di informazioni e documenti con le diverse competenze interne ed esterne?			
1 <i>Estremamente difficoltoso</i>	2 <i>Difficoltoso</i>	3 <i>Abbastanza semplice</i>	4 <i>Semplice</i>	5 <i>Estremamente semplice</i>
D.07	Come giudica il livello di coordinazione tra le fasi di progettazione e organizzazione e quelle di produzione dei pannelli, ovvero la capacità di trasferimento delle informazioni tra le due fasi (specifiche esecutive, stato di avanzamento delle lavorazioni, quantità di materiale utilizzato, ecc.)?			
1 <i>Estremamente difficoltoso</i>	2 <i>Difficoltoso</i>	3 <i>Abbastanza semplice</i>	4 <i>Semplice</i>	5 <i>Estremamente semplice</i>
D.08	Come giudica complessivamente il livello di sicurezza e salute per gli operatori coinvolti nella progettazione e produzione (interazione diretta con potenziali fonti di pericolo, fatica, stress, ecc.)?			
1 <i>Estremamente scarso</i>	2 <i>Scarso</i>	3 <i>Abbastanza buono</i>	4 <i>Buono</i>	5 <i>Ottimo</i>

Conclusioni

Gli approcci di riferimento per il settore delle costruzioni stanno radicalmente ridefinendosi in vista di traguardare gli obiettivi di competitività, riduzione delle emissioni, dello sfruttamento intensivo delle risorse e dei rifiuti, impostati dal programma europeo per l'imminente transizione ecologica e circolare. La trasformazione in chiave digitale rappresenta il driver di questo percorso, nonché il paradigma di riferimento per il ripensamento dell'intera filiera edilizia secondo principi di qualità e sostenibilità del prodotto e del processo edilizio. Ormai da diversi anni, l'approccio BIM nelle sue molteplici dimensioni (cosiddetto BIM nD), si è consolidato come uno dei più efficaci a sviluppare processi integrati per la progettazione, cantierizzazione e gestione delle opere. Il modello digitalizzato dell'edificio permette di materializzare, in un'unica piattaforma digitale, il continuo e multi-direzionale flusso di dati che devono essere scambiati tra gli attori e competenze della filiera per poter opportunamente controllare e gestire la crescente complessità del progetto. In questo scenario, la scelta di prefabbricare aggiunge un ulteriore livello di complessità per il progetto, immettendo nel processo creativo-decisionale le variabili connesse con la necessità di produrre industrialmente parti e/o componenti dell'edificio. I temi di transizione digitale devono dunque essere inquadrati nell'ambito delle realtà di produzione edilizia *off-site*, che sono chiamate ad adottare e integrare i paradigmi e le tecnologie digitali per l'Industria 4.0 – robotica avanzata, intelligenza artificiale, IoT, manifattura *lean* – per ottimizzare le sequenze di produzione, ridurre il consumo di risorse e l'impatto del ciclo di vita dei prodotti. La *smart factory* rappresenta un ecosistema ad elevato contenuto tecnologico, in cui le strumentazioni sono interconnesse in rete, scambiano ed elaborano informazioni, gestiscono la programmazione e l'esecuzione delle lavorazioni in maniera fluida, versatile e ottimizzata.

Tali innovazioni rappresentano il contesto culturale, scientifico e tecnologico che fa da sfondo alla proposta elaborata dalla ricerca, che ha avviato un processo di industrializzazione 4.0 della produzione di pannelli prefabbricati in cartone. La ricerca ha infatti inteso testare le innovazioni in atto sul tema della produzione edilizia e gestione informatizzata del progetto, mettendole a sistema con i potenziali di sostenibilità e circolarità di una tecnologia basata sull'uso del cartone. La proposta ha previsto l'implementazione di strumenti BIM, attualmente utilizzati in maniera prevalente per controllare gli aspetti architettonici e ingegneristici del progetto, estendendoli alla gestione delle fasi di produzione dei pannelli e all'organizzazione *lean* della fabbrica edilizia. L'approccio di riferimento è stato di tipo *file-to-factory*, ovvero un flusso che integrasse, a partire da un'unica piattaforma informativa, le diverse informazioni e competenze coinvolte nel processo edilizio, per trasferirle all'interno della fabbrica di produzione, mettendo in comunicazione gli strumenti BIM di progetto con i macchinari di lavorazione. I risultati dimostrano come, sfruttando le capacità computazionali dell'AI, sia possibile ridurre l'impatto generato dal ciclo di produzione dei componenti prefabbricati, razionalizzando il consumo di materiale e riducendo, in prospettiva, la produzione dei rifiuti. La digitalizzazione del processo migliora inoltre le capacità

di controllo sulla qualità del prodotto finale, allineando le prestazioni stabilite in fase di progetto a quelle effettivamente ottenute a valle della produzione. Ciò contribuisce anche all'eliminazione di possibili elementi di incertezza, errori e modifiche in fase di fabbricazione e assemblaggio dei componenti, rendendo prevedibili tempi e costi di intervento e potenziando, di conseguenza, la capacità produttiva dell'impianto. L'adozione del BIM in azienda rende inoltre possibile una gestione integrata del processo di progettazione e produzione, aumentando la coordinazione interna tra le differenti aree e figure professionali coinvolte. Infine, la facile riprogrammabilità delle sequenze abilita la flessibilità della produzione per adattare i prodotti in ottica di *mass customization* dei componenti edilizi, che possono dunque essere personalizzati secondo le illimitate configurazioni richieste dal progetto a fronte di minimi costi di riprogettazione del processo.

Rispetto al dibattito scientifico in corso sui temi della Construction 4.0 e transizione ecologica-circolare dei sistemi di produzione industrializzata, la ricerca ha avviato un progetto pilota che sarà successivamente scalato e implementato al controllo del processo edilizio nella sua interezza, con la finalità di efficientare le filiere di costruzione *off-site*. Inoltre, i risultati della ricerca forniscono dati e indicatori per dimostrare, alle aziende che operano nel settore privato della produzione edilizia, l'opportunità di attivare percorsi di specializzazione tesi alla virtualizzazione e integrazione digitale dei propri processi.

Le potenzialità di questo nuovo processo sono state testate e verificate rispetto ad un campo di applicazione, quello dell'edilizia scolastica di emergenza, che richiama urgentemente nuovi archetipi di riferimento, improntati alla qualità e alla sostenibilità dei manufatti. In questo campo, i prodotti della ricerca definiscono un modello innovativo di soluzione edilizia per la gestione delle contingenze emergenziali, rispondente alla normativa CAM per la sostenibilità delle opere pubbliche, supportato da un modello di produzione industriale circolare e compatibile, per tempi e volumi di produzione, con le esigenze di intervento in contesti emergenziali. Tale ambito rappresenta il contesto che accoglie i contenuti di innovazione promossi dalla ricerca, che potranno essere scalati in vista della corrispondenza del quadro esigenziale – sostenibilità, transitorietà, reversibilità del costruito – con le necessità dell'abitare contemporaneo. Un modello che, in vista delle imminenti sfide ambientali, dovremo necessariamente adottare come riferimento paradigmatico per ripensare ai metodi e agli approcci per il progetto di architettura.

Bibliografia

Pt. I Emergenza

- AA.VV. (2019). *Modern Methods of Construction. Introducing the MMC Definition Framework*. [Online] Available at: https://www.cast-consultancy.com/wp-content/uploads/2019/03/MMC-I-Pad-base_GOVUK-FINAL_SECURE.pdf (Accessed: 05th december 2021)
- Abanda, F. H., Tah, J. H. M., Cheung, F. K. T. (2017). BIM in off-site manufacturing for buildings. *Journal of Building Engineering*, 14(September), 89–102.
- Agarwal, B. R., Chandrasekaran, S., Sridhar, M. (2016). *Imagining Construction's Digital Future*. [Online] Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/imagining-constructions-digital-future#> (Accessed: 05th december 2021)
- Aghimien, D., Aigbavboa, C., Oke, A., Thwala, W., Moripe, P. (2020). Digitalization of construction organisations—a case for digital partnering. *International Journal of Construction Management*, 2331–2327.
- Alegre, A., Heitor, T. (2013). The evolution of secondary school building construction in Portugal in the 20th century: From traditional to industrial. *Construction History*, 28(2), 79–104.
- Alexander, D., Bhatia, S., Benouar, D., Kumar, J., Cardona, O. (2015). School Seismic Safety: Case Studies. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, 1–16.
- Alexander, D., Lewis, L., Ralph, J. (2000). *Condition of America's Public School Facilities: 2012-2013* (Issue: June)
- AMA Research (2020). *Prefabricated Volumetric Building Systems Market Report, UK 2020-2024*. [Online] Available at: <https://www.amaresearch.co.uk/report/prefabricated-volumetric-2020/> (Accessed: 20th december 2021)
- ANCE (2016). *Una politica industriale per il settore delle costruzioni. Le proposte dell'ANCE*. [Online] Available at: <http://www.ance.it/docs/docDownload.aspx?id=31772> (Accessed: 05th december 2021)
- ANCE (2019). *Osservatorio congiunturale sull'industria delle costruzioni*. [Online] Available at: <http://www.ance.it/docs/docDownload.aspx?id=53355> (Accessed: 05th december 2021)
- Ander, G. D., Pierce, R. A., Magar, C., Jones, E. (2003). *High Performance Relocatable Classrooms*. [Online] Available at: https://www.aceee.org/files/proceedings/2004/data/papers/SS04_Panel3_Paper01.pdf (Accessed: 05th december 2021)
- Antonini, E., Boeri, A., Gaspari, J., Gianfrate, V., Longo, D. (2015). La qualità dell'edilizia scolastica: Un'emergenza nazionale, un ambito di ricerca. *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 9, 114–122.
- Antonini, E., Giglio, F., Boeri, A. (2020). Toward permanent emergency: Design-Build-Living Reversible. *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 20, 70–80.
- Apte, M. G., Hodgson, A. T., Shendell, D. G., Dibartolomeo, D., Hochi, T., Kumar, S., Lee, S. M., Liff, S. M., Rainer, L. I., Schmidt, R. C., Sullivan, D. P., Diamond, R. C., Fisk, W. J. (2010). *Energy and Indoor Environmental Quality in Relocatable Classrooms*. July, 35–43.

- Arief, A., Burkhart, B. (2002). *Prefab*. Gibbs Smith.
- Audit Office of NSW (2017). *New South Wales Auditor-General's Report. Performance Audit. Planning for School Infrastructure*. [Online] Available at: https://media.opengov.nsw.gov.au/pairtree_root/3e/33/b8/f2/85/fc/41/a3/ac/98/cc/f9/6d/04/ff/d8/obj/01_Planning_for_school_infrastructure_Final_Report.pdf (Accessed: 22th december 2021)
- Bangnee, A. L. (1966). *Estimating Future School Enrolment in Developing Countries: A Manual of Methodology*. Report No. ST- SOA- SeriesA-40, United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, Paris (France) [Online] Available at: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED078545.pdf> (Accessed: 22th december 2021)
- Barocci, A. (2020). *L'emergenza Covid-19 e la situazione della scuola italiana: come usare la pandemia a nostro favore*. Lavori Pubblici [Online] <https://www.lavoripubblici.it/news/L-emergenza-Covid-19-e-la-situazione-della-scuola-italiana-come-usare-la-pandemia-a-nostro-favore-24580> (Accessed: 22th december 2021)
- Barrett, P., Davies, F., Zhang, Y., Barrett, L. (2015). The Impact of Classroom Design on Pupils' Learning: Final Results of a Holistic, Multi-level Analysis. *Building and Environment*, 89, 118–133.
- Barrett, P., Zhang, Y., Davies, F., Barrett, L. (2015). *Clever Classrooms. Summary report of the HEAD Project (Holistic Evidence and Design)* [Online] Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/42587797.pdf> (Accessed: 22th december 2021)
- Bauman, Z. (2002). *Modernità liquida*. Laterza
- Bello, M. A., Loftness, V. (2010). *Addressing Inadequate Investment in School Facility Maintenance*. Carnegie Mellon University, Research Showcase.
- Belpoliti, V., Calzolari, M., Davoli, P., Guerzoni, G. (2019). Il progetto esecutivo per l'esportabilità e l'assemblaggio off/on-site del sistema costruito. *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 18, 309–320.
- Bertoldini, M., Campioli, A., Ferrari, B., Grandi, G., Guastaroba, E., Lavagna, M., Zanelli, A. (2009). *Progettare oltre l'emergenza. Spazi e tecniche per l'abitare temporaneo*. Il Sole 24 Ore.
- Boafo, F. E., Kim, J. H., Kim, J. T. (2016). Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case study-based Review and Future Pathways. *Sustainability (Switzerland)*, 8(6), 558–574.
- Bologna, R. (2018). Complementarietà tra permanente e temporaneo. *AGATHÓN. International Journal of Architecture, Art and Design*, 04, 149–156.
- Bologna, R., Terpolilli, C. (2005). *Emergenza del progetto. Progetto dell'emergenza. Architetture con-temporaneità*. 24 Ore Cultura.
- Bolstad, R., Gilbert, J., McDowall, S., Bull, A., Boyd, S., Hipkins, R. (2012). *Supporting Future-oriented Learning and Teaching. A New Zealand Perspective*. [Online] Available at: https://www.educationcounts.govt.nz/__data/assets/pdf_file/0003/109317/994_Future-oriented-07062012.pdf (Accessed: 22th december 2021)
- Boulding, K.E. (1966). The economics of the Comining Spaceship Earth. In Jarret, H. (Ed.) *Environmental quality in a growing economy: Essays from the sixth RFF Forum*. RFF Press, New York.
- Boyi, A. A. (2013). Education and Sustainable National Development in Nigeria: Challenges and Way Forward. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 4(8), 147–152.
- Building Peace Foundation. (n.d.). *Re-Build* [Online] <http://www.buildingpeace-foundation.org/rebuild/> (Accessed: 22th december 2021)
- Buildoffsite (2020a). *Accelerating the Evolution of Design Management in Construction The COVID-19 effect*. [Online] Available at: <https://www.buildoffsite.com/content/uploads/2020/11/Post-covid-19-report-24.11.2020.pdf> (Accessed: 22th december 2021)

- Buildoffsite (2020b). *Offsite Sector Response to COVID-19 Impact*. [Online] Available at: https://issuu.com/buildoffsite3/docs/bos_response_f_i_n_a_l?fr=sMDc4YjcwODk1 (Accessed: 22th december 2021)
- Burman, E., Kimpian, J., Mumovic, D. (2018). Building Schools for the Future: Lessons Learned from Performance Evaluations of Five Secondary Schools and Academies in England. *Frontiers in Built Environment*, 4(April), 1–16.
- Cadag, J. R. D., Petal, M., Luna, E., Gaillard, J. C., Pambid, L., Santos, G. V. (2017). Hidden disasters: Recurrent Flooding Impacts on Educational Continuity in the Philippines. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 25(July), 72–81.
- California Air Resources Board (2003). *California Portable Classroom Study*. [Online] Available at: <https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/california-portable-classrooms-study> (Accessed: 22th december 2021)
- California Air Resources Board (2005). *Indoor Air Pollution in California. Clinical Handbook of Air Pollution-Related Diseases*. [Online] Available at: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-05/rpt0705.pdf> (Accessed: 05th december 2021)
- California Air Resources Board, California Department of Health Services (2004). *Environmental Health Conditions in California's Portable Classrooms*. [Online] Available at: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic//research/apr/reports/l3006.pdf> (Accessed: 20th december 2021)
- Callahan, M. P., Parker, D. S., Sherwin, J. R., Anello, M. T. (1999). *Evaluation of Energy Efficiency Improvements to Portable Classrooms in Florida*. [Online] Available at: <http://publications.energyresearch.ucf.edu/wp-content/uploads/2018/06/FSEC-CR-1133-99.pdf> (Accessed: 04th november 2021)
- Callahan, M. P., Parker, D. S., Sherwin, J. R., Anello, M. T. (2000). *Demonstrated Energy Savings of Efficiency Improvements to a Portable Classroom*. Proceedings ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 3, 361–375.
- Camera dei Deputati (2020). *Edilizia scolastica e sicurezza nelle scuole*. [Online] Available at: <https://www.camera.it/temiap/documentazione/temi/pdf/1105567.pdf> (Accessed: 10th december 2021)
- Caneta Research Inc. (2009). *Portable Classroom Controller Study*. [Online] Available at: <http://www.oneinenergysavings.com/wp-content/uploads/2011/08/Portable-Classroom-Controller-Study-Mar-2009.pdf> (Accessed: 18th december 2021)
- Cangelli, E., Conteduca, M. (2018). Architecture on demand. Nuovi scenari per il progetto e l'industria delle costruzioni. *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 16, 96–104.
- Celli, L., Rosa, D. De, Frateili, E. (1984). *Prefabbricare l'architettura. Indirizzi progettuali per la scuola della prima infanzia*. Franco Angeli.
- Ceranic, B., Beardmore, J., Cox, A. (2017). A Novel Modular Design Approach to “Thermal Capacity on Demand” in a Rapid Deployment Building Solutions: Case Study of Smart-POD. *Energy Procedia*, 134, 776–786.
- Ceranic, B., Beardmore, J., Cox, A. (2018). Rapid Deployment Modular Building Solutions and Climatic Adaptability: Case Based Study of a Novel Approach to “Thermal Capacity on Demand.” *Energy and Buildings*, 167, 124–135.
- Cheung Chan, T. (2006). Portable vs. Permanent Classrooms: A Quasi-Experimental Study of Fifth Graders' Attitude and Mathematics Achievement. *Eastern Education Journal*, 35(1), 69–75.
- Cheung Chan, T. (2009). Do Portable Classrooms Impact Teaching and Learning? *Journal of Educational Administration*, 47(3), 290–304.
- Cittadinanzattiva (2018). *XVI Rapporto sulla sicurezza delle scuole. I cittadini e l'accesso alle informazioni*. [Online] Available at: https://www.cittadinanzattiva.it/files/primo_piano/scuola/rapporto-scuola-xvi/ABSTRACT_XVIRapporto-scuola_2018_def.pdf (Accessed: 18th december 2021)

- Clyde&Co. (2016). *2016 Global Industry 4.0 Survey. Industry 4.0: Building the digital enterprise*. [Online] Available at: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf> (Accessed: 18th december 2021)
- Clyde&Co. (2019). *Climate Change: the Construction Industry*. [Online] Available at: <https://online.flippingbook.com/view/114668/> (Accessed: 18th december 2021)
- Commissione Europea (2001). *COM(2001) 68. Libro Verde sulla Politica Integrata Relativa ai Prodotti*. [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=LEGISSUM%3Al28011> (Accessed: 22th december 2021)
- Commissione Europea (2009). *COM(2009) 512. Preparing for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies in the EU* [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0512:FIN:EN:PDF> (Accessed: 20th december 2021)
- Commissione Europea (2015). *COM(2015) 614. L'anello mancante - Piano d'azione dell'Unione europea per l'economia circolare*. [Online] Available at: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0009.02/DOC_1&format=PDF (Accessed: 20th december 2021)
- Commissione Europea (2018). *Horizon Europe Strategic Plan 2021-2024*. [Online] Available at: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/research_and_innovation/funding/documents/ec_rtd_horizon-europe-strategic-plan-2021-24.pdf (Accessed: 20th december 2021)
- Commissione Europea (2019a) *The European Green Deal* [Online] https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it (Accessed: 22th december 2021)
- Commissione Europea (2019b). *Climate-resilient pathways for the development of concrete infrastructure: Adaptation, mitigation and sustainability*. [Online] <https://cordis.europa.eu/project/id/658475/it> (Accessed: 20th december 2021)
- Commissione Europea (2020a). *Una strategia per le PMI per un'Europa sostenibile e digitale*. [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0103&from=IT> (Accessed: 20th december 2021)
- Commissione Europea (2020b). *COM(2020)98. A New Industrial Strategy for Europe*. [Online] Available at: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-eu-industrial-strategy-march-2020_en.pdf (Accessed: 10th december 2021)
- Commissione Europea (2020c). *Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare. Per un'Europa più pulita e più competitiva*. [Online] Available at: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0020.02/DOC_1&format=PDF (Accessed: 10th december 2021)
- Commissione Europea (2021a). *Embodied Energy & Carbon*. [Online] Available at: <https://web.archive.org/web/20080926085547/http://www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied/> (Accessed: 20th december 2021)
- Commissione Europea (2021b). *Horizon Europe. Investing to shape our future*. [Online] Available at: https://ec.europa.eu/info/files/horizon-europe-investing-shape-our-future_en (Accessed: 10th december 2021)
- Comune di Milano (2020). *Scuola. Il piano d'azione del Comune di Milano per la ripresa: spazi adeguati e sicuri dentro e fuori gli edifici, rilevazione delle temperature per la fascia 0-6, investimenti per DPI e pulizie*. [Online] <https://www.comune.milano.it/-/scuola.-il-piano-d-azione-del-comune-di-milano-per-la-ripresa-spazi-adeeguati-e-sicuri-dentro-e-fuori-gli-edifici-rilevazione-delle-temperature-per-la-fascia-0-6-investimenti-per-dpi-e-pulizie-> (Accessed: 22th december 2021)
- Comunità Europea (2000). *Carta dei diritti fondamentali dell'Unione Europea*. [Online] Available at: https://www.europarl.europa.eu/charter/pdf/text_it.pdf (Accessed: 05th december 2021)
- Consiglio d'Europa (1952). *Protocollo addizionale alla Convenzione europea per la salvaguardia dei diritti dell'uomo e delle libertà fondamentali*. [Online] Available at: [https://www.senato.it/documenti/repository/CONVENZIONE/Protocollo addizionale.pdf](https://www.senato.it/documenti/repository/CONVENZIONE/Protocollo%20addizionale.pdf) (Accessed: 20th december 2021)

- Consiglio d'Europa (1996). *Carta sociale europea*. [Online] Available at: <https://rm.coe.int/168047e179> (Accessed: 20th december 2021)
- Consiglio d'Europa (2009). *Conclusioni del Consiglio del 12 maggio 2009 su un quadro strategico per la cooperazione europea nel settore dell'istruzione e della formazione («ET 2020»)*. [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2009:119:0002:0010:it:PDF> (Accessed: 20th december 2021)
- Coronese, M., Lamperti, F., Keller, K., Chiaromonte, F., Roventini, A. (2019). Evidence for sharp increase in the economic damages of extreme natural disasters. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(43), 21450–21455.
- CRESME (2019). *XXVII Rapporto Congiunturale e Previsionale CRESME. Il mercato delle Costruzioni 2020. Lo scenario di medio periodo 2019-2024. Il valore economico dell'ambiente costruito*. [Online] Available at: <http://www.cresme.it/it/congiunturale-cresme.aspx> (Accessed: 20th december 2021)
- Cuadrado, J., Zubizarreta, M., Roji, E., Larrauri, M., Alvarez, I. (2016). Sustainability assessment methodology for industrial buildings: three case studies. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 33(2), 106–124.
- D'Auria, A. (2014). *Abitare nell'emergenza. Progettare il post-disastro*. EDIFIR.
- Davidson, N. (2019). *The Anthropocene epoch: have we entered a new phase of planetary history?*. The Guardian [Online] <https://www.theguardian.com/environment/2019/may/30/anthropocene-epoch-have-we-entered-a-new-phase-of-planetary-history> (Accessed: 20th december 2021)
- DeFronzo, D.J. (n.d.). *Report on the Condition of Connecticut's Public School Facilities*. [Online] Available at: <https://portal.ct.gov/-/media/DAS/Office-of-School-Construction-Grants/Task-188---Required-Forms-Regarding-Plan-Review-and-Approval/FORM-SCG-7600-DAS-Report-on-CT-Public-School-Facilities-2013---.pdf> (Accessed: 15th december 2021)
- Della Torre, S., Bocciarelli, M., Daglio, L., Neri, R. (ed.) (2020). *Buildings for Education. Research for Development*. Springer.
- Department for Education and Skills (2003). *Building Schools for the Future*. [Online] Available at: https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20130401151715/http://www.education.gov.uk/publications/eOrderingDownload/DfES_0134_200MIG469.pdf (Accessed: 20th december 2021)
- Department of Jobs Regions and Precincts (2019). *Prefabricated Construction in Victoria*. [Online] Available at: https://business.vic.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/1880571/Prefabricated_Construction_Victorian_Business_Supply_Chain_Directory.pdf (Accessed: 20th december 2021)
- Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia. [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:IT:PDF> (Accessed: 21 january 2022)
- Distefano, D. L. (2019). *Prefab Lightness. Cardboard Architecture Responds to Emergency. Design, Prototyping and Testing of a High Performance Emergency House-kit*. PhD Dissertation, University of Catania.
- Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S., Culp, C. H. (2010). Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, 42(8), 1238–1247.
- Dodge Data & Analytics. (2020). *Prefabrication and Modular Construction 2020 SmartMarket Report*. [Online] Available at: <https://www.amaresearch.co.uk/report/prefabricated-volumetric-2020/> (Accessed: 10th december 2021)
- Du, Q., Bao, T., Li, Y., Huang, Y., Shao, L. (2019). Impact of prefabrication technology on the cradle-to-site CO2 emissions of residential buildings. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(7), 1499–1514.
- Earthman, G. (2002). *School Facility Conditions and Student Academic Achievement*. [Online] Available at: <https://escholarship.org/uc/item/5sw56439> (Accessed: 10th december 2021)

- Edelman, H., Vihola, J., Laak, M., Annila, P. (2016). Resiliency of Prefabricated Daycares and Schools: Finnish Perspective to Relocatable Education Facilities. *International Journal of Strategic Property Management*, 20(3), 316–327.
- Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy. Economic and business rationale for an accelerated transition*. [Online] Available at: <https://emf.thirdlight.com/link/x8ay372a3r11-k6775n/@/preview/1?o> (Accessed: 10th december 2021)
- Ellen MacArthur Foundation (2015). *Delivering the Circular Economy a Toolkit for Policymakers Executive Summary. In Ellen MacArthur Foundation*. [Online] Available at: <https://emf.thirdlight.com/link/kewgovk138d6-k5kszv/@/preview/1?o> (Accessed: 10th december 2021)
- Ellen MacArthur Foundation, McKinsey Center for Business and Environment (2015). *Growth within: a circular economy vision for a competitive europe*. [Online] Available at: <https://emf.thirdlight.com/link/8izw1qhml4ga-404t-sz/@/preview/1?o> (Accessed: 10th december 2021)
- EOD (2021). *Earth Overshoot Day*. [Online] <https://www.overshootday.org/> (Accessed: 17th january 2022)
- European Education and Culture Executive Agency, Eurydice (2021), *Recommended annual instruction time in full-time compulsory education in Europe, 2020/21*. [Online] Available at: <https://data.europa.eu/doi/10.2797/14312> (Accessed: 20th december 2021)
- Eurostat (2010). *Europe in Figures. Eurostat Yearbook 2010*. [Online] Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5721265/KS-CD-10-220-EN.PDF.pdf/e47b231c-c411-4d4e-8cd6-e0257be4f2e6?t=1414775246000> (Accessed: 10th december 2021)
- Fernandez, A., Black, J., Jones, M., Wilson, L., Salvador-Carulla, L., Astell-Burt, T., & Black, D. (2015). Flooding and Mental Health: A Systematic Mapping Review. *PLoS ONE*, 10(4).
- Figliola, A. (2019). Immaginare il settore delle costruzioni nel 2050. Innovazione tecnologica e verticalità. *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 17, 213–221.
- Fondazione Agnelli (2019). *Rapporto sull'Edilizia Scolastica*. [Online] Available at: <https://www.fondazioneagnelli.it/wp-content/uploads/2019/11/presentazione-Rapporto-edilizia-scolastica.pdf> (Accessed: 10th december 2021)
- Fondazione Agnelli (2020a). *La ripartenza della scuola all'estero*. [Online] Available at: <https://www.fondazioneagnelli.it/wp-content/uploads/2020/05/La-ripartenza-della-scuola-allestero-1405.pdf> (Accessed: 05th december 2021)
- Fondazione Agnelli (2020b). *Fare spazio. Idee progettuali per riaprire le scuole in sicurezza*. [Online] Available at: <https://www.fondazioneagnelli.it/wp-content/uploads/2020/08/Fondazione-Agnelli-e-FULL-PoliTo-FARE-SPAZIO-030820.pdf> (Accessed: 10th december 2021)
- Fonzi, M. (2019). *All'Aquila ragazze e ragazzi chiedono di tornare nelle loro scuole*. L'Internazionale [Online] <https://www.internazionale.it/reportage/mattia-fonzi/2019/04/05/terremoto-aquila-scuole> (Accessed: 10th december 2021)
- Friedman, Y. (1978). *L'architettura di sopravvivenza. Una filosofia della povertà*. Bollati Boringheri (ed.)
- Fuller, R. J., Luther, M. B. (2003). Using Small Reverse Cycle Air Conditioners in Relocatable Classrooms: A Case Study. *Energy and Buildings*, 35(6), 619–629.
- Gallo, P. (2020). Habitat mutevoli e soluzioni innovative per la scuola del futuro. In M. Perriccioli, M. Rigillo, S. Russo Ermolli, F. Tucci (ed.), *Design in the Digital Age*. Maggioli Editore.
- Gallo, P., Romano, R. (2017). *Educare al progetto sostenibile. Il rapporto tra uomo, ambiente e tecnologia*. DIDAPress.
- Galluccio, G. (2019). *Processi digitali avanzati per l'industria delle costruzioni 4.0. BIM, digital manufacturing e prefabbricazione in CFS*. Aracne.

- Gianotti, E. (1970). *La industrializzazione dell'edilizia scolastica*. Casabella, 34(348), 48.
- Gibson, C. L., Eathough, C. L. (1968). *The Portable Classroom Impact on Educational Programs and School Facility Financing in California*. [Online] Available at: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED036049.pdf> (Accessed: 20th december 2021)
- Giglio, F. (2018). Low Tech e materiali non convenzionali. *Misura, Tempo, Luogo. TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 16, 122–130.
- Global Partnership for Education (2019). *Results Report 2019. Global Partnership for Education*. [Online] Available at: https://www.theglobalfund.org/media/8752/corporate_2019resultsreport_report_en.pdf <https://www.globalpartnership.org/content/results-report-2019> (Accessed: 10th december 2021)
- Goetz, L. (2014). *Fabrication + Adaptation: A System for Replacing Elementary School Portable Classrooms throughout California*. University of Washington. [Online] Available at: <https://digital.lib.washington.edu/researchworks/handle/1773/27342> (Accessed: 20th december 2021)
- Gore, N. (2012). Designing Better Portable Classrooms. *Proceedings of ACSA Fall Conference*, 121–126.
- Graves, J. (2010). The Academic Impact of Multi-track Year-round School calendars: A Response to School Overcrowding. *Journal of Urban Economics*, 67(3), 378–391.
- Gruijters, R. J., Chan, T. W., Ermisch, J. (2019). Trends in Educational Mobility: How does China Compare to Europe and The United States? *Chinese Journal of Sociology*, 5(2), 214–240.
- Guo, S., Zheng, S., Hu, Y., Hong, J., Wu, X., Tang, M. (2019). Embodied energy use in the global construction industry. *Applied Energy*, 256(September).
- Gusmerotti, N. M., Frey, M., Iraldo, F. (2020). *Management dell'economia circolare. Principi, drivers, modelli di business e misurazione*. Franco Angeli, Milano.
- Hawaii Department of Education (2014). *2014 Exhibition of School Planning and Architecture. Energy Positive Portable Classroom*. [Online] Available at: https://businessdocbox.com/Green_Solutions/70226937-2014-exhibition-of-school-planning-and-architecture.html (Accessed: 10th december 2021)
- Hertzberger, H. (2008). *Space and Learning*. 010 Publisher.
- Heschong, L., Wright, R. L., Okura, S. (2002). Daylighting Impacts on Human Performance in School. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 31(2), 101–114.
- Hodgson, A. T., Apte, M. G., Norman, B., Faulkner, D., Hotchi, T. (2008). *Improving Ventilation and Saving Energy: Final Report on Indoor Environmental Quality and Energy Monitoring in Sixteen Relocatable Classrooms*. [Online] Available at: <https://indoor.lbl.gov/publications/improving-ventilation-and-saving> (Accessed: 20th december 2021)
- Hodgson, A. T., Shendell, D. G., Fisk, W. J., Apte, M. G. (2004). Comparison of Predicted and Derived Measures of Volatile Organic Compounds Inside Four New Relocatable Classrooms. *Indoor Air, Supplement*, 14(8), 135–144.
- Hodgson, A., Fisk, W., Shendell, D., & Apte, M. (2001). *Predicted Concentrations in New Relocatable Classrooms of Volatile Organic Compounds Emitted from Standard and Alternate Interior Finish Materials*. [Online] Available at: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc737426/> (Accessed: 06th december 2021)
- Housing Advisory Service Project Edition (1978). *You Can Build It!*. University of California.
- Howland, M. (2019). *Jumpstarting the Future. Modular Buildings Create a Smart Solution for STEM Schools. Learning by Design*. [Online] Available at: https://www.aceee.org/files/proceedings/2004/data/papers/SS04_Panel3_Paper01.pdf (Accessed: 20th december 2021)
- Hviid, C. A., Pedersen, C., & Dabelsteen, K. H. (2020). A Field Study of the Individual and Combined Effect of Ventilation Rate and lighting conditions on pupils' performance. *Building and Environment*, 171(August)

- IEA (2013). *Transition to Sustainable Buildings*. [Online] Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/1e-300ab6-44de-41dc-8714-ee12a4800943/Building2013_free.pdf (Accessed: 06th december 2021)
- IEA (2019). *2019 Global Status Report for Buildings and Construction*. [Online] Available at: <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019> (Accessed: 06th december 2021)
- INDIRE (2014). *Manifesto delle avanguardie educative*. [Online] Available at: <https://www.indire.it/wp-content/uploads/2015/08/Manifesto-AE-definitivo.pdf> (Accessed: 22th december 2021)
- INDIRE (2020a). *Indagine tra i docenti italiani. Pratiche didattiche durante il lockdown. Report preliminare*. [Online] Available at: <http://www.indire.it/wp-content/uploads/2020/07/Pratiche-didattiche-durante-il-lockdown-Report-2.pdf> (Accessed: 20th december 2021)
- INDIRE (2020b). *Misure per la riapertura delle strutture per l'educazione e cura della prima infanzia nell'emergenza Covid-19 in alcuni paesi europei*. [Online] Available at: http://eurydice.indire.it/wp-content/uploads/2020/07/rapporto_misure_riapertura_ECEC_UE-1.pdf (Accessed: 20th december 2021)
- IPCC (2004). *Climate Change 2014 Synthesis Report*. [Online] Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf (Accessed: 21th december 2021)
- ISPRA (2017). *Fattori di emissione atmosferica di CO2 e altri gas a effetto serra nel settore elettrico*. [Online] Available at: https://www.isprambiente.gov.it/files2017/pubblicazioni/rapporto/R_257_17.pdf (Accessed: 06th december 2021)
- Jansen van Vuuren, T., Middleton, C. (2020). *Methodology for Quantifying the Benefits of Offsite Construction*. Buildoffsite, CIRIA. [Online] Available at: <https://www.ciria.org/ItemDetail?iProductCode=C792F&Category=FREEPUB-S&WebsiteKey=3f18c87a-d62b-4eca-8ef4-9b09309c1c91> (Accessed: 06th december 2021)
- Jimenez-Castellanos, O. (2010). Relationship Between Educational Resources and School Achievement: A Mixed Method Intra-District Analysis. *Urban Review*, 42(4), 351–371.
- Kagermann, H., Lukas, W.-D., & Wahlster, W. (2011). *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*. VDI Nachrichten. [Online] Available at: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution> (Accessed: 20th december 2021)
- Katchen, M., LaPierre, A., Charlin, C., Brucker, B., Ferguson, P. (2001). Evaluating Potential Health Risks in Relocatable Classrooms. *The Journal of School Health*, 71(4), 159–161.
- Krug, D., Miles, J. (2013). *Off-site Construction: Sustainability Characteristics. June 2013*. [Online] Available at: https://www.buildoffsite.com/content/uploads/2015/03/BoS_offsiteconstruction_1307091.pdf (Accessed: 20th december 2021)
- Kubow, P. K. (2019). Through a Girl's Eyes: Social Ontologies of Citizen Identity Among Jordanian and Refugee Students in Jordan's Double-shift Secondary Schools. *Prospects*, 48(3–4), 135–155.
- La scuola dopo il Covid, a Milano le aule non bastano: "Serve almeno il 20% di spazio in più"*. MilanoToday [Online] <https://www.milanotoday.it/attualita/coronavirus/aule-scuole-spazi.html> (Accessed: 22th december 2021)
- Lackney, J. (1994). Educational Facilities: The Impact and Role of the Physical Environment of the School on Teaching, Learning and Educational Outcomes. In C. for A. and U. P. R. Books (Ed.), *Johnson Controls Institute for Environmental Quality in Architecture*. [Online] Available at: <http://eric.ed.gov/?id=ED466574> (Accessed: 20th december 2021)
- Lauria, M. (2018), *La reversibilità del costruire*. AGATHÓN. International Journal of Architecture, Art and Design, 3, 63-70.
- Lauria, M., Azzalin, M. (2019), Progetto e manutenibilità nell'era di Industria 4.0. *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 20, 184-190

- Lavy, S., & Bilbo, D. L. (2009). Facilities Maintenance Management Practices in Large Public Schools, Texas. *Facilities*, 27(1–2), 5–20.
- Le Brocq, R., De Young, A., Montague, G., Pocock, S., March, S., Triggell, N., Rabaa, C., Kenardy, J. (2017). Schools and Natural Disaster Recovery: The Unique and Vital Role That Teachers and Education Professionals Play in Ensuring the Mental Health of Students Following Natural Disasters. *Journal of Psychologists and Counsellors in Schools*, 27(1), 1–23.
- Legambiente (2018a). *Ecosistema Scuola. XIX Rapporto di Legambiente sulla qualità dell'edilizia scolastica, delle strutture e dei servizi*. [Online] Available at: https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/ecosistema_scuola_2018.pdf (Accessed: 20th december 2021)
- Legambiente (2018b). *Lo stato di avanzamento dei lavori nelle aree colpite dal sisma. SAE, scuole, patrimonio culturale, macerie: dati e proposte di Legambiente*. [Online] Available at: https://www.legambiente.it/sites/default/files/docs/dossier_secondo_anniversario_terremoto_in_centro_italia.pdf (Accessed: 20th december 2021)
- Lehne, J., Preston, F. (2018). *Making Concrete Change. Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. [Online] Available at: www.chathamhouse.org (Accessed: 08th december 2021)
- Leoni, S. (2021). The challenge of circularity in the construction sector. *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 22, 22-27
- Leščešen, I., Bibić, L. I., Dragin, A., Balent, D. (2013). Problems of Teaching Organisation in Combined (split) Classes in Rural Areas of the Republic of Serbia. *Geographica Pannonica*, 17(2), 37–45.
- Lingard, H., Francis, V. (2009). *Managing Work-Life Balance in Construction*. Routledge.
- Lucas, I. R., Kowalski, P., Callahan, D. B., Noonan, G. P., Moffett, D. B., Olson, D. R., Malilay, J. (2016). Formaldehyde Levels in Traditional and Portable Classrooms: A pilot investigation. *Journal of Environmental Health*, 78(7), 8–44.
- Lunenburg, F. C. (2010). School Facilities Management. *National Forum of Educational Administration & Supervision Journal*, 27(4).
- Luther, M. (2002). Energy Use in Relocatable Classrooms. Modern Practice of Architectural Science: From Pedagogy to Andragogy? *Proceedings of the 36th Conference of the Australian and New Zealand Architectural Science Association, Geelong, November, 2002*, 285–290.
- Mahony, P., Hextall, I., Richardson, M. (2011). “Building Schools for the Future”: Reflections on a New Social Architecture. *Journal of Education Policy*, 26(3), 341–360.
- Manenti, M., Coccagna, M. (2014). Le nostre scuole prima di tutto. *Paesaggio Urbano*, 4, 15–41.
- Marrone, P., Piferi, C., Scolaro, A. M., Belardi, E., Demurtas, M., Giardinelli, M. G., Orsini, F., Santi, V., Sichi, A. (2020). Nuove tecnologie per l’abitare del futuro. Una proposta per la Milano del 2100. *AGATHÓN. International Journal of Architecture, Art and Design*, 8, 188–199.
- Matshipi, M. G., Mulaudzi, N. O., Mashau, T. S. (2017). Causes of Overcrowded Classes in Rural Primary Schools. *Journal of Social Sciences*, 51(1–3), 109–114.
- McMullen, S. C., Rouse, K. E. (2012). School Crowding, Year-round Schooling, and Mobile Classroom Use: Evidence from North Carolina. *Economics of Education Review*, 31(5), 812–823.
- Mendell, M. J., Eliseeva, E. A., Davies, M. M., Spears, M., Lobscheid, A., Fisk, W. J., Apte, M. G. (2013). Association of Classroom Ventilation with Reduced Illness Absence: A Prospective Study in California Elementary Schools. *Indoor Air*, 23(6), 515–528.
- Merschbrock, C., & Erik Munkvold, B. (2012). A research review on building information modeling in construction-an area ripe for is research. *Communications of the Association for Information Systems*, 31(1).

- Michael, P., Danny, S., Parker, D. S. (1998). *Energy Efficient Florida Educational Facilities Improvements to a Portable Classroom in a Volusia County School*. [Online] Available at: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED428506.pdf> (Accessed: 22th december 2021)
- MINEDU (2013). *Censo Educativo 2013*. [Online] Available at: <http://escale.minedu.gob.pe/censo-escolar-eol/> (Accessed: 22th december 2021)
- Ministero della Giustizia (2020) *Atto di Indirizzo Politico-istituzionale per l'anno 2020*.
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2007). *Piano d'Azione Nazionale per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione. Piano Nazionale d'Azione sul Green Public Procurement - PAN GPP*. [Online] Available at: https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/GPP/all.to_19_PAN_GPP_definitivo__21_12_2007.pdf
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2015). *Il Green Public Procurement: uno strumento strategico per il rilancio di un'economia sostenibile*. [Online] Available at: https://www.reteclima.it/wp-content/uploads/opuscolo_MATTM_GPP_14122015.pdf (Accessed: 22th december 2021)
- Ministero delle Economie e delle Finanze. (2021). *Next Generation Italia. Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza*. [Online] Available at: http://www.governo.it/sites/new.governo.it/files/PNRR_2021.pdf (Accessed: 22th december 2021)
- Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G. M., Gruner, R. L., Colling, M. (2018). Strategies for applying the circular economy to prefabricated buildings. *Buildings*, 8(9).
- Mirrahimi, S., Ibrahim, N. L. N., Surat, M. (2012). Effect of Daylighting on Student Health and Performance. *Computational Methods in Science and Engineering*, 5(4), 127–132.
- MIUR (2016). *Programma Nazionale per la Ricerca 2021-2027. I grandi ambiti di ricerca e innovazione*. [Online] Available at: https://www.istruzione.it/allegati/2016/PNR_2015-2020.pdf (Accessed: 22th december 2021)
- Močinić, S., Moscarda, C. (2016). L'Ambiente Come Fattore Di Apprendimento Nella Scuola Dell'Infanzia. *Studia Polensia*, 05(01), 1–20.
- Modular Building Institute (2014a). *2014 Permanent Modular Construction Annual Report*. [Online] Available at: https://www.modular.org/documents/document_publication/2014-RB-PMC-Annual-Reports.pdf (Accessed: 22th december 2021)
- Modular Building Institute (2014b). *2014 Relocatable buildings Annual Report*. [Online] Available at: https://www.modular.org/HtmlPage.aspx?name=2014_Annual_Reports_MA (Accessed: 22th december 2021)
- Morabito, G., Palumbo, R. (1966). Industrializzazione e prefabbricazione nella edilizia scolastica all'estero: aspetti ed esperienze. *L'industria Italiana Del Cemento*, Anno XXXVI Aprile-Maggio
- Moradiboustouni, M., Vale, B., Isaacs, N. (2018). Prefabrication: New Zealand Manufacturers of Prefabricated Buildings and Components 2017. In P. Rajagopalan & M. M. Andamon (Eds.), *Engaging Architectural Science: Meeting the Challenges of Higher Density: 52nd International Conference of the Architectural Science Association 2018* (Issue: November), 137–144. The Architectural Science Association and RMIT University, Australia.
- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153(October).
- Mosa, E., Tosi, L. (2016). *Ambienti di apprendimento innovativi. Una panoramica tra ricerca e casi di studio*. [Online] Available at: <http://bricks.maieutiche.economia.unitn.it/2016/03/18/ambienti-di-apprendimento-innovativi-una-panoramica-tra-ricerca-e-casi-di-studio/> (Accessed: 22th december 2021)
- Mura, M. G. (2015). Perchè ripensare lo spazio della scuola? In *Dirigenti scolastici di nuova generazione. 24 saggi sulle funzioni del dirigente scolastico con riferimenti alla L. 13 luglio 2015, n.107*.

- Mutch, C. (2015). The role of schools in disaster settings: Learning from the 2010-2011 New Zealand earthquakes. *International Journal of Educational Development*, 41, 283–291.
- Nakanishi, H., Black, J. (2016). Residential Relocation, School Relocation and Children's Transport: The effect of the Great East Japan Earthquake and Tsunami 2011. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 18, 232–243.
- National Audit Office (2009). *The Building Schools for the Future programme: Renewing the secondary school estate (Issue: February)*. [Online] Available at: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20170207052351/https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2009/02/0809135.pdf> (Accessed: 22th december 2021)
- Nava, C., Mistretta, M. (2019). Climate change and circular economy: Enabling technologies and life-cycle thinking for sustainable development. *ArchHistoR*, 12(6), 544–553.
- Navaratnam, S., Ngo, T., Gunawardena, T., Henderson, D. (2019). Performance review of prefabricated building systems and future research in Australia. *Buildings*, 9(2), 1–14.
- NCES (2007). *Public School Principals Report on Their School Facilities: Fall 2005 (NCES 2007-007)*. [Online] Available at: <https://nces.ed.gov/pubs2007/2007007.pdf> (Accessed: 20th december 2021)
- NCES (2019). *Projections of Education Statistics to 2027*. [Online] Available at: <https://nces.ed.gov/pubs2019/2019001.pdf> (Accessed: 20th december 2021)
- Newton, C. (2009). Learning Through Prefabrication. Undisciplined! *Design Research Society Conference 2008, Sheffield Hallam University, Sheffield, UK, 16-19 July 2008*, 16–19. [Online] Available at: <http://shura.shu.ac.uk/497/%5C-nhttp://shura.shu.ac.uk/id/eprint/497> (Accessed: 20th december 2021)
- Newton, C., Backhouse, S. (2012). *Redefining the Relocatable: Multidisciplinary design for a wicked problem. Architecture as Human Interface*. [Online] Available at: <https://minerva-access.unimelb.edu.au/bitstream/handle/11343/191699/Redefining%20the%20Relocatable%20Multidisciplinary%20design%20for%20a%20wicked%20problem.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Accessed: 22th december 2021)
- Newton, C., Backhouse, S., Aibinu, A. A., Cleveland, B., Crawford, R. H., Holzer, D., Soccio, P., Kvan, T. (2018). Plug n Play: Future Prefab for Smart Green Schools. *Buildings*, 8(7), 88–104.
- Newton, C., Backhouse, S., Fisher, K., Gan, L., Grose, M., Hes, D., Howard, P., Kvan, T., Monie, J. & Wilks, S. (2011). *Future Proofing Schools The Phase 1 Research Compilation*. Faculty of Architecture Building and Planning, University of Melbourne. [Online] Available at: <https://minerva-access.unimelb.edu.au/handle/11343/159099> (Accessed: 20th december 2021)
- Newton, C., Backhouse, S., Fisher, K., Gan, L., Grose, M., Hes, D., Howard, P., Kvan, T., Monie, J. & Wilks, S. (2012). *Future Proofing Schools: The Phase 2 Research: Competition*. Faculty of Architecture Building and Planning, University of Melbourne. [Online] Available at: <https://minerva-access.unimelb.edu.au/handle/11343/178360> (Accessed: 20th december 2021)
- Newton, C., Cleveland, B. (2015). The Other Half of the Picture: Post-occupancy Evaluation for Alignment of Space and Pedagogy. *Living and Learning: Research for a Better Built Environment: 49th International Conference of the Architectural Science Association*, 588–597.
- Newton, C., Leonard, R., Backhouse, S., Wilks, S., Monie, J., Gan, L., Kvan, T., Soccio, P., Hes, D., Featherston, M., Grose, M. & Fisher, K. (2012). *Future Proofing Schools The Phase 3 Research Reflections*. Faculty of Architecture Building and Planning, University of Melbourne. [Online] Available at: <https://minerva-access.unimelb.edu.au/handle/11343/159098> (Accessed: 20th december 2021)
- North Carolina Southern Center (1999). *Purchasing a High Performance Portable Classroom Portable Classrooms. What Makes a Portable Classroom a High Performance Portable Enhancements*. [Online] Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=AF13B7BB90EA7F9E220AA8B0BB87F374?doi=10.1.1.400.3955&rep=rep1&type=pdf> (Accessed: 18th december 2021)

- OECD (2020). *Education at a Glance*. [Online] Available at: <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/b35a14e5-en.pdf?expires=1642871791&id=id&accname=guest&checksum=85A47385986CC9B87AB84DB5DFA0CC9C> (Accessed: 20th december 2021)
- Oesterreich, T. D., 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. *Computers in Industry*, 83, 121–139.
- ONU (1948). *Dichiarazione universale dei diritti umani*. [Online] Available at: https://www.ohchr.org/EN/UDHR/Documents/UDHR_Translations/itn.pdf (Accessed: 10th december 2021)
- ONU (1966). *Patto internazionale relativo ai diritti economici, sociali e culturali*. [Online] Available at: https://fedlex.data.admin.ch/filestore/fedlex.data.admin.ch/eli/cc/1993/725_725_725/20150313/it/pdf-a/fedlex-data-admin-ch-eli-cc-1993-725_725_725-20150313-it-pdf-a.pdf (Accessed: 20th december 2021)
- ONU (1989). *Convenzione sui diritti del fanciullo fatta a New York il 20 novembre 1989*. NBER Working Paper Series [Online] Available at: <https://www.unhcr.org/publications/manuals/4d9352319/unhcr-protection-training-manual-european-border-entry-officials-2-legal.html?query=excom> 1989 (Accessed: 20th december 2021)
- ONU (2015). *Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. Transforming our world. The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E (Accessed: 05th december 2021)
- ONU (2020). *Policy Brief: Education during COVID-19 and beyond*. [Online] Available at: https://unsdg.un.org/sites/default/files/2020-08/sg_policy_brief_covid-19_and_education_august_2020.pdf (Accessed: 20th december 2021)
- Orazi, M. (2021). *Il PNRR scopre l'urbanistica. Recovery e architettura. Draghi rilancia la "scuola modulo"*. Il Foglio [Online] <https://www.ilfoglio.it/cultura/2021/10/30/news/recovery-e-architettura-draghi-rilancia-la-scuola-modulo--3266461/> (Accessed: 28th december 2021)
- Oxfam (n.d.). *Emergenze*. [Online] <https://www.oxfamitalia.org/cosa-facciamo/emergenze/> (Accessed: 28th december 2021)
- Pane, J. F. M., McCaffrey, D. F., Kalra, N., Zhou, A. J. (2008). *Effects of Student Displacement in Louisiana During the First Academic Year After the Hurricanes of 2005*. Taylor and Francis Group. [Online] Available at: <https://www.rand.org/pubs/reprints/RP1379.html> (Accessed: 14th november 2021)
- Parker, D. S., Fairey, P. W. (2001). *Preliminary Evaluation of Energy-efficiency Improvements to Modular Classrooms*. [Online] Available at: <http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/html/FSEC-CR-1272-01/index.htm> (Accessed: 28th december 2021)
- Patterson, J., Chandler, M., Jiang, B., Chan, T. C. (2009). Portable Classrooms: Immediate Solutions to a "Growing" Problem. *School Business Affairs*, 23–25. [Online] Available at: <http://www.asbointl.org/SchoolBusinessAffairsMagazine.htm> (Accessed: 28th december 2021)
- Pons, O. (2013). Assessing the Sustainability of Prefabricated Buildings. In *Eco-Efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies*, 434–456.
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP*, 52, 173–178.
- Raper, G. M. (2005). *North Carolina Performance Enhanced Relocatable Classroom Project: an Evaluation of Design Changes to a Typical Relocatable Classroom*. Master Degree Dissertation, North Carolina State University.
- Regione Emilia-Romagna (2017). *Fare Scuola. Ricostruzione, Innovazione, Comunità*. [Online] Available at: <http://www.comune.mirandola.mo.it/pdf/fare-scuola-programma-del-convegno/view> (Accessed: 28th december 2021)

- Regione Toscana (2018). *Strategia di Ricerca e Innovazione per la Smart Specialisation in Toscana*. [Online] Available at: https://www.regione.toscana.it/documents/16409/15122760/ALL_A_14feb2019.pdf/2c8f52d0-cace-422d-be60-0fb2955e2f1e (Accessed: 28th december 2021)
- RIBA (2014). *Building a Better Britain*. [Online] Available at: [http://www.architecture.com/RIBA/Campaigns and issues/ Assets/Files/BuildingABetterBritain.pdf](http://www.architecture.com/RIBA/Campaigns%20and%20issues/Assets/Files/BuildingABetterBritain.pdf) (Accessed: 20th december 2021)
- Rigaud, K. K., de Sherbinin, A., Jones, B., Bergmann, J., Clement, V., Ober, K., Schewe, J., Adamo, S., McCusker, B., Heuser, S., Midgley, A. (2018). *Groundswell. Preparing for Internal Climate Migration*. The World Bank Group [Online] Available at: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29461> (Accessed: 20th december 2021)
- Saavedra, J. (2016). Plan Selva: Infraestructura Educativa en la Amazonía Peruana. *Arkinka, Revista de Arquitectura, Diseño y Construcción*, 249, 24–51.
- Salmi, S., Martine-Tebow, R., Kohnen, N., Azar, A. (2017). *Cost-Effective K-3 Classrooms Assessment. An Analysis of Advanced Sustainable Materials, Innovative Design and Procurement Options*. [Online] Available at: <https://ofm.wa.gov/sites/default/files/public/publications/Cost-EffectiveK-3ClassroomsAssessment.pdf> (Accessed: 20th december 2021)
- Santa Cruz County Grand Jury (2004). *Portable Classroom Investigation*. [Online] Available at: [https://www.co.santa-cruz.ca.us/Portals/0/County/grandjury/GJ2004/5- 1 Portablesfinal.pdf](https://www.co.santa-cruz.ca.us/Portals/0/County/grandjury/GJ2004/5-1%20Portablesfinal.pdf) (Accessed: 20th december 2021)
- Santoianni, F. (2017). Lo spazio e la formazione del pensiero: la scuola come ambiente di apprendimento. *RTH - Education & Philosophy: Think Tanks per Il Futuro Della Ricerca Nelle Scienze Umane*, 4, 37–43.
- Schwatka, N. V., Butler, L. M., Rosecrance, J. R. (2012). An aging workforce and injury in the construction industry. *Epidemiologic Reviews*, 34(1), 156–167.
- Sesana, M. M., Salvalai, G. (2013). Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for ZEBs. *Building and Environment*, 67, 211–216.
- Sferra, A. S. (2017). Emergenza: quale innovazione nei componenti prefabbricati per una edilizia ecosolidale. *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 14, 330–336.
- Shah, J., Inamullah, H. M. (2016). The Impact of Overcrowded Classroom on the Academic Performance of the Students at Secondary Level. *International Journal of Research in Commerce, Economics & Management*, 2(6), 9–11.
- Shendell, D. G. (2003). *Assessment of Organic Compound Exposures, Thermal Comfort Parameters, and HVAC System-driven Air Exchange Rates in Public school Portable Classrooms in California*. University of California [Online] Available at: <https://escholarship.org/uc/item/4333b2t2> (Accessed: 20th december 2021)
- Shendell, D. G., Winer, A. M., Stock, T. H., Zhang, L., Zhang, J., Maberti, S., Colome, S. D. (2004). Air Concentrations of VOCs in Portable and Traditional Classrooms: Results of a Pilot Study in Los Angeles County. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 14, 44–59.
- Shendell, D. G., Winer, A. M., Weker, R., Colome, S. D. (2004). Evidence of Inadequate Ventilation in Portable Classrooms: Results of a Pilot Study in Los Angeles County. *Indoor Air*, 14(3), 154–158.
- Slee, B., Hyde, R. (2014). Toward a New Framework for Improving the Environmental Performance of Demountable Classrooms. A Study in New South Wales. *Across: Architectural Research through to Practice: 48th International Conference of the Architectural Science Association 2014*, 219–302.
- Slee, B., Hyde, R. (2015). The NSW Demountable Classroom: an Analytical Study to Improve This Radical Building Solution for Education. In T. A. S. A. and T. U. of Melbourne (Ed.), *Living and Learning: Research for a Better Built Environment: 49th International Conference of the Architectural Science Association 2015*, 85–99.

- Slee, B., Hyde, R. (2016). Improving the Thermal Performance and Energy Efficiency of NSW Demountable Classrooms Using a Community Led Retrofitting Strategy. A Proposal for Broken Hill. *Proceedings of the 9th International Windsor Conference 2016: Making Comfort Relevant, Cumberland Lodge, Windsor, UK, 7-10 April 2014*, April, 1165–1185.
- Slee, B., Hyde, R., Blair, J., & Junghans, L. (2015). The NSW Demountable Classroom: A review of Existing Research and a Proposed Methodology for Future Research. *2014 Asia-Pacific Solar Research Conference, New South Wales University, 8-10 December 2014*.
- Smith, R. S. (2010). *Prefab Architecture. A Guide to Modular Design and Construction*. Inc, John Wiley & Sons.
- Smith, R. S., Quale, J. D. (2017). *Offsite Architecture. Constructing the Future*. Routledge.
- SOER (2020). *European Environment: State and Outlook 2020*. [Online] Available at: <https://www.eea.europa.eu/highlights/soer2020-europes-environment-state-and-outlook-report> (Accessed: 20th december 2021)
- Staib, G., Dörrhöfer, A., & Rosenthal, M. (2007). *Components and Systems. Modular Construction. Design, Structure, New Technologies*. Detail.
- State of New Jersey (2012). *Moving Forward with a New Approach to School Construction. Biannual Report of the School Facilities Construction Program. For the period of October 1, 2011 through March 31, 2012*. [Online] Available at: https://dspace.njstatelib.org/xmlui/bitstream/handle/10929/35024/schools_development_authority_06012012.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Accessed: 20th december 2021)
- State of NSW (2018). *NSW State Infrastructure Strategy Report*. [Online] Available at: https://insw-sis.visualise.today/documents/INSW_2018SIS_BuildingMomentum.pdf (Accessed: 20th december 2021)
- Stephanie D. Thomas-Rees, Parker, D. S., Sherwin, J. R. (2009). Lesson Learned in Portable Classrooms. *ASHRAE Journal*, 51(5), 30–41.
- Straub, A., Frankena, K. (2018). Decision Support Tools for Energy Efficient and Healthy School Buildings. *TEMA*, 4(3).
- Teng, Y., Li, K., Pan, W., Ng, T. (2018). Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: Evidence from and gaps in empirical studies. *Building and Environment*, 132, 125–136.
- Teng, Y., Pan, W. (2020). Estimating and Minimizing Embodied Carbon of Prefabricated High-rise Residential Buildings Considering Parameter, Scenario and Model Uncertainties. *Building and Environment*, 180.
- The Scape Group (2019). *The School Places. Challenge 2019*. [Online] Available at: <https://www.scapegroup.co.uk/uploads/research/The-School-Places-Challenge-2019.pdf> (Accessed: 20th december 2021)
- The Sydney Morning Herald (2018). *School Overcrowding Must be Addressed Sooner Rather Than Later*. [Online] <https://www.smh.com.au/national/nsw/school-overcrowding-must-be-addressed-sooner-rather-than-later-20180208-p4yzqe.html> (Accessed: 20th december 2021)
- Thomas-Rees, S. D., Parker, D. S., Sherwin, J. R. (2004). Preliminary Evaluation of Performance Enhanced Relocatable Classrooms in Three Climates Specifications for Experimental Classrooms. *2004 ACEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, American Council for an Energy Efficient Economy, Washington D.C., August 2004*, 312–324.
- Tooley, J., Dixon, P., Olaniyan, O. (2005). Private and Public Schooling in Low-income Areas of Lagos State, Nigeria: A Census and Comparative Survey. *International Journal of Educational Research*, 43(3), 125–146.
- Toyinbo, O., Phipatanakul, W., Shaughnessy, R., Haverinen-Shaughnessy, U. (2019). Building and indoor environmental quality assessment of Nigerian primary schools: A pilot study. *Indoor Air*, 29(3), 510–520.
- Treccani (2016). *Antropocene*. [Online] https://www.treccani.it/vocabolario/antropocene_%28Neologismi%29/ (Accessed: 22th december 2021)

- UNESCO (2000). *The Dakar Framework for Action. Education for All: Meeting our Collective Commit.* [Online] Available at: <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001211/121147e.pdf> (Accessed: 13th december 2021)
- UNESCO (2014). *Shaping the Future We Want UN Decade of Education for Sustainable Development. 2005-2014 Final Report. In United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.* [Online] Available at: <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002301/230171e.pdf> (Accessed: 13th december 2021)
- UNHCR (2016). *No more excuses: Provide education to all forcibly displaced people.* [Online] Available at: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000244847> (Accessed: 13th december 2021)
- UNHCR (2020). Trends at a Glance: Global Trends Forced Displacement in 2019. In *UNHCR The UN Refugee Agency.* <https://www.unhcr.org/5ee200e37.pdf> (Accessed: 13th december 2021)
- VEGA Engineering (2019). *Elaborazione Statistica degli Infortuni Mortali sul Lavoro - base dati INAIL.* [Online] Available at: <https://www.vegaengineering.com/dati-osservatorio/allegati/Statistiche-Morti-Lavoro-COVID-19-Osservatorio-Sicurezza-Lavoro-Vega-Engineering-28.02.2021.pdf> (Accessed: 13th december 2021)
- Victorian School Building Authority. (2020). *Building Quality Standards Handbook (May).* Victoria State Government [Online] Available at: <https://www.education.vic.gov.au/Documents/school/principals/infrastructure/vsba-building-quality-handbook.pdf> (Accessed: 28th december 2021)
- Victorian School Building Authority. (n.d.). *Permanent modular school buildings.* [Online] <https://www.schoolbuildings.vic.gov.au/permanent-modular-school-buildings-program> (Accessed: 28th december 2021)
- Vinante, C., Gribaudo, E., Pavanetto, R., Basso, D. (2019). *6 actions for the transition to Circular Economy. The REsolve framework. HBI Green Paper n. 16.* [Online] Available at: http://www.hbigroup.it/wp-content/uploads/2019/06/HBI_GP16.pdf (Accessed: 28h december 2021)
- Vincent-Lancrin, S. (2008). What is the Impact of Demography on Higher Education Systems? A Forward-looking Approach for OECD Countries. In OECD (Ed.), *Higher Education to 2030*, 1, 41-103.
- Wakefield, J. (2002). Learning the Hard Way. The Poor Environment of America's Schools. *Environmental Health Perspectives*, 110(6), 298–305.
- Wargocki, P., Porras-Salazar, J. A., Contreras-Espinoza, S., Bahnfleth, W. (2020). The Relationships Between Classroom Air Quality and Children's Performance in School. *Building and Environment*, 173.
- Wargocki, P., Wyon, D. P. (2006). Effects of HVAC on Student Performance. *ASHRAE Journal*, 48, 23–28.
- Wargocki, P., Wyon, D. P. (2014). Providing Better Thermal and Air Quality Conditions in School Classrooms Would be Cost-effective. *Building and Environment*, 59, 581–589.
- Watson, J. A. (1993). *The Use of Relocatable Classrooms in the Public School Districts of Florida.* [Online] Available at: https://scholarcommons.usf.edu/arts_pub/32/ (Accessed: 28th december 2021)
- Winters, C. (2007). Planning for Disaster: Education Policy in the Wake of Hurricane Katrina. *Multicultural Education*, 15(2), 39.
- Wong, J. P. C., Iyer-Raniga, U. (2011). An Integrated Approach to Energy Analysis in Building Design. The Relocatable Classroom Project. *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November*, 2587–2594.
- World Commission on Environment and Development (1988). *The Brundtland Report: "Our Common Future".* [Online] Available at: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf> (Accessed: 20th december 2021)
- Zanelli, A., Giurdanella, V., Superbi, G., Viscuso, S. (2010). *Assemblage, la libertà costruttiva. Il progetto d'abitazione mediante elementi industriali e kit personalizzabili.* Il Sole 24 Ore (ed.)

Pt. II Materiali, tecniche e metodi di produzione

- Sosa (2008). *Peter Stutchbury & Richard Smith. The Cardboard House*. [Online] <https://5osa.com/70> (Accessed 20th december 2021)
- AA.VV. (1976). *Radical technology*. G. Boyle & P. Harper (Ed.)
- AA.VV. (2017). *Handbook for the Design of Modular Structures*. Monash University. [Online] Available at: <https://ita.calameo.com/read/005664529a009d7488ed6> (Accessed 20th december 2021)
- AA.VV. (2019). *Modern Methods of Construction. Introducing the MMC Definition Framework*. [Online] Available at: https://www.cast-consultancy.com/wp-content/uploads/2019/03/MMC-I-Pad-base_GOVUK-FINAL_SECURE.pdf (Accessed: 05th december 2021)
- Abanda, F. H., Tah, J. H. M., Cheung, F. K. T. (2017). BIM in off-site manufacturing for buildings. *Journal of Building Engineering*, 14(September), 89–102.
- Alaloul, W. S., Liew, M. S., Zawawi, N. A. W. A., Kennedy, I. B. (2020). Industrial Revolution 4.0 in the construction industry: Challenges and opportunities for stakeholders. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(1), 225–230.
- An, S., Martinez, P., Al-Hussein, M., & Ahmad, R. (2020). BIM-based decision support system for automated manufacturability check of wood frame assemblies. *Automation in Construction*, 111(June).
- Archicart. (2021). *Paper Stre-wall*. [Online] <https://www.archicart.com/paper-stre-wall/> (Accessed 20th december 2021)
- Arieff, A., Burkhart, B. (2002). *Prefab*. Gibbs Smith.
- Asdrubali, F., Pisello, A. L., D'Alessandro, F., Bianchi, F., Cornicchia, M., Fabiani, C. (2015). Innovative cardboard based panels with recycled material: thermal and acoustics analysis. In Elsevier (Ed.), *6th International Building Physics Conference, IBPC 2015*, 321–326.
- Aye, L., Ngo, T., Crawford, R. H., Gammampila, R., Mendis, P. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. *Energy and Buildings*, 47, 159–168.
- Begić, H., Galić, M. (2021). A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise. *Buildings*, 11(8), 337.
- Biagini, C. (2020). Oltre la modellazione informativa : “componibilità come composizione”. *Firenze Architettura*, 0772, 96–101.
- Boafo, F. E., Kim, J. H., Kim, J. T. (2016). Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case study-based Review and Future Pathways. *Sustainability (Switzerland)*, 8(6), 558–574.
- Boton, C., Forgues, D. (2018). Practices and Processes in BIM Projects: An Exploratory Case Study. *Advances in Civil Engineering*, 2018.
- Cascone, S., Russo, G., Tomasello, N. (2018). An Historical Study on Temporary and Emergency Post-disaster Housing. *Technologies Engineering Materials Architecture*, 4, 2(January 2019), 19.
- Cepi (2019). *Sustainability Report*. [Online] Available at: https://sustainability.cepi.org/wp-content/uploads/2018/10/CEPI_Sustainability_report_full_update.pdf (Accessed 20th december 2021)
- Cepi ContainerBoard (2014). *Lista Europea delle qualità di carta per cartone ondulato*. [Online] Available at: [https://www.comieco.org/downloads/8584/4612/Cepi ContainerBoard List Italian-APRIL 2014.pdf](https://www.comieco.org/downloads/8584/4612/Cepi%20ContainerBoard%20List%20Italian-APRIL%202014.pdf) (Accessed 18th december 2021)

- Cetica, P. A. (1993). *L'edilizia di terza generazione. Breviario di poetica per il progetto nella strategia del costruire*. Franco Angeli, Milano.
- Clyde&Co. (2018). *Embracing the Revolution: Legal and Industry Perspectives ad Off-site Manufacturing Gains Traction*. [Online] Available at: https://www.clydeco.com/clyde/media/fileslibrary/Reports/PC_Off-site_Manufacturing_Report.pdf (Accessed 20th december 2021)
- Comieco (2012). *10 anni di carta e cartone. 2002-2012: prodotti, progetti ed eventi raccontati da Matrec*. https://www.comieco.org/downloads/7688/3621/Comieco_Matrec_10_anni_di_carta_e_cartone_2.pdf [Online] Available at: (Accessed 20th december 2021)
- Comieco (2021). *26° Rapporto. Raccolta, riciclo e recupero di carta e cartone*. [Online] Available at: https://www.comieco.org/downloads/15167/8590/COMIECO_26Rapporto_2021_dati%20anno%202020.pdf (Accessed 20th december 2021)
- Cottrell & Vermeulen (n.d.). *Westborough Cardboard Building. Projects, Educational*. [Online] <https://www.cv-arch.co.uk/westborough-cardboard-building/> (Accessed 18th december 2021)
- Cripps, A. (2004). Cardboard as a construction material: A case study. *Building Research and Information*, 32(3), 207–219.
- Cripps, A. (n.d.). *Building real buildings with cardboard*. [Online] Available at: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB4990.pdf> (Accessed 05th december 2021)
- Cripps, A. (n.d.). *Building with cardboard: the reality*. [Online] Available at: www.burohappold.com or www.cardboardschool.co.uk (Accessed 05th december 2021)
- D'Emilio, M. (2016). Oltre il prototipo nulla. Evoluzioni e fallimenti nella prefabbricazione modulare. L'ADC L'architettura delle città. *The Journal of the Scientific Society Ludovico Quaroni*, 12-13, 93–102.
- Da Costa, M. B., Dos Santos, L. M. A. L., Schaefer, J. L., Baierle, I. C., Nara, E. O. B. (2019). Industry 4.0 technologies basic network identification. *Scientometrics*, 121(2), 977–994.
- Dara, C., Hachem-Vermette, C., Assefa, G. (2019). Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of Container-based Single-Family Housing in Canada: A case study. *Building and Environment*, 163.
- Davidson, N. (2019). *The Anthropocene epoch: have we entered a new phase of planetary history?* The Guardian. [Online] <https://www.theguardian.com/environment/2019/may/30/anthropocene-epoch-have-we-entered-a-new-phase-of-planetary-history> (Accessed 05th december 2021)
- Davila Delgado, J. M., Oyedele, L., Ajayi, A., Akanbi, L., Akinade, O., Bilal, M., Owolabi, H. (2019). Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption. *Journal of Building Engineering*, 26(January).
- Distefano, D. L. (2014). *Archicart. Architettura di cartone*. Master Degree Dissertation, Università di Catania (Unpublished).
- Distefano, D. L. (2019). *Prefab Lightness. Cardboard Architecture Responds to Emergency. Design, Prototyping and Testing of a High Performance Emergency House-kit*. PhD Dissertation, University of Catania.
- Distefano, D. L., Gagliano, A., Naboni, E., Sapienza, V., Timpanaro, N. (2018). Thermophysical Characterization of a Cardboard Emergency Kit-house. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 5(3), 168–174.
- Dörries, C., Zahradnik, S. (2019). *Container and Modular Buildings. Construction and Design Manual*. Dom Publishers.

- Dubas, S., & Paślawski, J. (2018). Methods of Construction Quality Issues Elimination with Use of Modern Technology. *Proceedings of MATEC Web of Conferences*, 222.
- Ejsmont, K., & Gladysz, B. (2020). Impact of Industry 4.0 on Sustainability- Bibliometric Literature Review. *Sustainability*, 12, 5650.
- El Jazzar, M., Schranz, C., Urban, H., & Nassereddine, H. (2021). Integrating Construction 4.0 Technologies: A Four-Layer Implementation Plan. *Frontiers in Built Environment*, 7(November), 0–14.
- Emanuele, N. (2007). *Il cartone ondulato e le caratteristiche delle carte per ondulatore*. [Online] Available at: <https://docplayer.it/17783471-Il-cartone-ondulato-e-le-caratteristiche-delle-carte-per-ondulatore.html> (Accessed 22th december 2021)
- Ermolli, S. R., Galluccio, G. (2019). Industrializzazione edilizia e prefabbricazione tra materialità e immaterialità. *AGATHÓN. International Journal of Architecture, Art and Design*, 5, 93–100.
- Fiction Factory. (n.d.). *WikkelHouse*. [Online] <https://www.fictionfactory.nl/en/wikkelhouse/> (Accessed 20th december 2021)
- Filho, J. B. P. dantas, Lima, M. M. X. de, Heineck, L. F. M., Tzortzopoulos, P., Neto, J. de P. B. (2017). Waiting Times in Design Process: a Case Study. *LC3 2017 Volume II - Proceedings of the 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, Walsh, K., Sacks, R., Brilakis, I. (Eds.). Heraklion, Greece, 483–489.
- Forcael, E., Ferrari, I., Opazo-vega, A. (2020). Construction 4.0: A Literature Review. *Sustainability (Switzerland)*, 12, 9755.
- Garaffa, G. (2018). *Valutazione sperimentale dell'isolamento acustico di pannelli in cartone ondulato*. Master Degree Dissertation, Università di Catania (Unpublished).
- Generalova, E. M., Generalov, V. P., Kuznetsova, A. A. (2016). Modular Buildings in Modern Construction. *Procedia Engineering*, 153, 167–172.
- Goodier, C., Gibb, A., Mancini, M., Turck, C., Gjepali, O., Daniels, E. (2019). Modularisation and Offsite in Engineering Construction: An Early Decision-support Tool. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering*, 172(6), 3–14.
- Gropius, W. (1968). *Architettura integrata*. Il saggiaatore.
- Gurrieri, F. (1988). *Pierluigi Spadolini Architetto. Umanesimo e Tecnologia*. Electa.
- Hager, I., Golonka, A., & Putanowicz, R. (2016). 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Procedia Engineering*, 151, 292–299.
- Haniel Geschäftsbericht (2015). *The four phases of the industrial revolution*. [Online] Available at: <http://haniel.unternehmensberichte.net/reports/haniel/annual/2015/gb/English/1045/the-four-phases-of-the-industrial-revolution.html> (Accessed 20th december 2021)
- Hentschke, C. S., Amorim, L. G., Formoso, C. T., Tzortzopoulos, P., & Echeveste, M. E. S. (2019). Connections Between Mass Customisation Practices in Housing and Lean Production. In C. Pasquire & F. R. Hamzeh (Eds.), *27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC 2019*, 1369–1380.
- Herbert, G. (1985). *The Dream of the Factory Made House. Walter Gropius and Konrad Wachsmann*. The MIT Press.
- Horner, M., El-haram, M., & Vitali, D. (2019). *Project: Advanced Industrialised Methods for the Construction of Homes (AIMCH), WP2: Productivity Mapping & Literature Review*. [Online] Available at: https://www.aimch.co.uk/images/docs/AIMCH_-_Productivity_mapping_and_literature_review_-_Final_version_with_cover.pdf (Accessed 20th december 2021)

- IED. (n.d.). *The 4 Industrial Revolutions*. [Online] <https://ied.eu/project-updates/the-4-industrial-revolutions/> (Accessed 20th december 2021)
- Imperiale, A. (2012). American Wartime Dream: The Packaged House System of Konrad Wachsmann and Walter Gropius. *ACSA Fall Conference*, 39–43.
- Jaberizadeh, M., Joshaghani, A. (2018). Reduction of Energy Consumption in Buildings by Using Technology " Building Information Modeling ". *International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Management in Iran Tehran University, August 2018*.
- Jansen van Vuuren, T., Middleton, C. (2020). *Methodology for Quantifying the Benefits of Offsite Construction. Buildoffsite*, CIRIA. [Online] Available at: <https://www.ciria.org/ItemDetail?iProductCode=C792F&Category=FREEPUB-S&WebsiteKey=3f18c87a-d62b-4eca-8ef4-9b09309c1c91> (Accessed 20th december 2021)
- Jensen, K., Nielsen, K., Brunoe, T. (2016). Application of Mass Customization in the Construction Industry. *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS), Sep 2015, Tokyo, Japan*, 161–168.
- Jiang, Y., Zhao, D., Wang, D., Xing, Y. (2019). Sustainable performance of buildings through modular prefabrication in the construction phase: A comparative study. *Sustainability (Switzerland)*, 11(20).
- Kagermann, H., Lukas, W.-D., Wahlster, W. (2011). *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*. *VDI Nachrichten* [Online] Available at: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution> (Accessed 20th december 2021)
- Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. (2013). Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. In *Final Report of the Industrie 4.0 Working Group (Issue: April)*. [Online] Available at: <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf> (Accessed 20th december 2021)
- Kamali, M., Hewage, K. (2016). Life Cycle Performance of Modular Buildings: A Critical Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1171–1183.
- Karmakar, A., Delhi, V. S. K. (2021). Construction 4.0: What we know and where we are headed? *Journal of Information Technology in Construction*, 26(July), 526–545.
- Kieran, S., Timberlake, J. (2004). *Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies are poised to Transform Building Construction*. McGraw Hill.
- Knaack, U., Chung-Klatte, S., Hasselbach, R. (2012). *Prefabricated Systems. Principles of Construction*. Birkhauser.
- Krug, D., Miles, J. (2013). *Off-site Construction: Sustainability Characteristics. June 2013*. [Online] Available at: https://www.buildoffsite.com/content/uploads/2015/03/BoS_offsiteconstruction_1307091.pdf (Accessed: 20th december 2021)
- Latka, J. F. (2017). *Paper in architecture. Research by design, engineering and prototyping*. PhD Dissertation, Delft University of Technology.
- Lavikka, R., Kallio, J., Casey, T., Airaksinen, M. (2018). Digital disruption of the AEC industry: technology-oriented scenarios for possible future development paths. *Construction Management and Economics*, 36(11), 635–650.
- Lawson, M., Ogden, R., Goodier, C. (2014). *Design in Modular Construction*. Taylor & Francis Group.
- Lehmann, S. (2013). Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions. *Sustainable Cities and Society*, 6(1), 57–67.
- Lekan, A., Clinton, A., Fayomi, O. S. I., James, O. (2020). Lean thinking and industrial 4.0 approach to achieving construction 4.0 for industrialization and technological development. *Buildings*, 10(12), 1–27.

- Luna-Tintos, J. F., Cobrerros, C., Herrera-Limones, R., López-Escamilla, A. (2020). "Methodology comparative analysis" in the solar decathlon competition: A proposed housing model based on a prefabricated structural system. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6).
- Lupacchini, A. (2018). *Sistemi di prefabbricazione in legno*. Altralinea.
- Ma, K., Dawood, N., Kassem, M. (2016). BIM for Manufacturing: a Case Study Demonstrating Benefits and Workflows and an Approach for Enterprise Application Integration (EAI). *13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, December 12-13, 2016, Hong Kong*.
- Manzoor, B., Othman, I., Pomares, J. C. (2021). Digital technologies in the architecture, engineering and construction (AEC) industry—a bibliometric—qualitative literature review of research activities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(11).
- Mapston, M., Westbrook, C. (2010). Prefabricated Building Units and Modern Methods of Construction (MMC). *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*, 427–454.
- Maskuriy, R., Selamat, A., Maresova, P., Krejcar, O., David, O. O. (2019). Industry 4.0 for the construction industry: Review of management perspective. *Economies*, 7(3), 1–14.
- MBI (2010). *Improving Construction Efficiency & Productivity with Modular Construction*. [Online] Available at: https://www.modular.org/marketing/documents/Whitepaper_ImprovingConstructionEfficiency.pdf (Accessed 20th december 2021)
- Miller, S. A., Moore, F. C. (2020). Climate and health damages from global concrete production. *Nature Climate Change*, 10(5), 439–443.
- Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G. M., Gruner, R. L., Colling, M. (2018). Strategies for applying the circular economy to prefabricated buildings. *Buildings*, 8(9).
- Miranda, G. (2020). *Pannello strutturale in cartone ondulato. Modellazione meccanica del materiale base e del componente edilizio*. Master Degree Dissertation, Università di Catania (Unpublished)
- Muñoz-La Rivera, F., Mora-Serrano, J., Valero, I., Oñate, E. (2020). Methodological-Technological Framework for Construction 4.0. *Archives of Computational Methods in Engineering*.
- Musa, M. F., Mohammad, M. F., Mahbub, R., Yusof, M. R. (2014). Enhancing the Quality of Life by Adopting Sustainable Modular Industrialised Building System (IBS) in the Malaysian Construction Industry. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 153, 79–89.
- Navaratnam, S., Ngo, T., Gunawardena, T., Henderson, D. (2019). Performance review of prefabricated building systems and future research in Australia. *Buildings*, 9(2), 1–14.
- Negri, E. (2007). *Il cartone ondulato e le caratteristiche delle carte per onduttore*. [Online] Available at: <https://docplayer.it/17783471-Il-cartone-ondulato-e-le-caratteristiche-delle-carte-per-onduttore.html> (Accessed: 20th december 2021)
- Newman, C., Edwards, D., Martek, I., Lai, J., Thwala, W. D., Rillie, I. (2020). Industry 4.0 deployment in the construction industry: a bibliometric literature review and UK-based case study. *Smart and Sustainable Built Environment*.
- Oesterreich, T. D., 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. *Computers in Industry*, 83, 121–139.
- Open Systems Lab (2018). *Using WikiHouse. A introductory guide for your project*. [Online] Available at: https://files.cargocollective.com/c229869/WHouse_Guide_1.1.pdf (Accessed: 20th december 2021)

- Orlowski, K. (2020). Automated manufacturing for timber-based panelised wall systems. *Automation in Construction*, 109(October 2019), 102988.
- Pasetti Monizza, G., Bendetti, C., Matt, D. T. (2018). Parametric and Generative Design Techniques in Mass-production Environments as Effective Enablers of Industry 4.0 Approaches in the Building Industry. *Automation in Construction*, 92(April), 270–285.
- Perrot, A., Rangeard, D., Courteille, E. (2018). 3D printing of earth-based materials: Processing aspects. *Construction and Building Materials*, 172, 670–676.
- Piroozfar, P., Altan, H., Popovic-Larsen, O. (2012). Design for Sustainability: A Comparative Study of a Customized Modern Method of Construction Versus Conventional Methods of Construction. *Architectural Engineering and Design Management*, 8(1), 55–75.
- Reagan, S. S. (2004). Lean Manufacturing Principles. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 13–18.
- Rogora, A. (a cura di) (2006). *Carta e cartone in edilizia*. Edicom.
- Roland Berger (2020). *Digitalization in the Construction Industry*. [Online] Available at: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/tab_digitization_construction_industry_e_final.pdf (Accessed 05th december 2021)
- Ruggiero, R. (2019). Progetto esecutivo e processi di costruzione digitale. Una sperimentazione costruttiva tra Italia e Giappone. *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 18, 300–308.
- Salama, T., Salah, A., Moselhi, O., & Al-Hussein, M. (2017). Near optimum selection of module configuration for efficient modular construction. *Automation in Construction*, 83, 316–329.
- Salavatian, S. (2016). *Design of cardboard prefabricated temporary dwellings through economic and hygrothermal assessment According to nZEB requirements in warm- temperate climates*. PhD Dissertation, Università Politecnica delle Marche.
- Santachiara, D. (2016). *Download design. Manutenzione straordinaria della cultura materiale*. 24 Ore Cultura.
- Scavo, G. (2018). *Pannello alveolare in cartone ondulato Archicart: caratterizzazione del materiale base e modellazione meccanica del componente*. Master Degree Dissertation, Università di Catania (Unpublished).
- Schimanski, C. P., Marcher, C., Toller, G., Monizza, G. P., Matt, D. T. (2019). *Enhancing Automation in the Construction Equipment Industry Through Implementation of BIM*. Springer International Publishing.
- Schimanski, C. P., Monizza, G. P., Marcher, C., Matt, D. T. (2019). Conceptual foundations for a new lean BIM-based production system in construction. *27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC 2019*, 877–888.
- Serra Soriano, B., Verdejo Gimeno, P., Díaz Segura, A., Merí De La Maza, R. (2014). Assembling Sustainable Ideas: The Construction Process of the Proposal SMLsystem at the Solar Decathlon Europe 2012. *Energy and Buildings*, 83, 186–194.
- Shen, J., Copertaro, B., Zhang, X., Koke, J., Kaufmann, P., Krause, S. (2020). Exploring the Potential of Climate-adaptive Container Building Design Under Future Climates Scenarios in Three Different Climate Zones. *Sustainability (Switzerland)*, 12(1), 108–129.
- Silva, M. F., Jayasinghe, L. B., Waldmann, D., & Hertweck, F. (2020). Recyclable architecture: Prefabricated and recyclable typologies. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4).
- Smith, R. S. (2010). *Prefab Architecture. A Guide to Modular Design and Construction*. Inc, John Wiley & Sons.
- Smith, R. S., Quale, J. D. (2017). *Offsite Architecture. Constructing the Future*. Routledge.

- Solopova, N. (2012). Dai pannelli alla città. Alcune tappe nella storia della prefabbricazione pesante in URSS. *Storia Urbana*, 101, 77–106.
- Spadolini, P. L. (1966). *Componibilità come composizione*. LEF.
- Sprague, P. E. (1981). The Origin of Balloon Framing. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 40(4), 311–319.
- Staib, G., Dörrhöfer, A., Rosenthal, M. (2007). *Components and Systems. Modular Construction. Design, Structure, New Technologies*. Detail.
- Structural Insulated Panels Association (n.d.). *What are SIPs*. [Online] <https://www.sips.org/what-are-sips> (Accessed 15th January 2022)
- Tavares, V., Lacerda, N., Freire, F. (2019). Embodied energy and greenhouse gas emissions analysis of a prefabricated modular house: The “Moby” case study. *Journal of Cleaner Production*, 212, 1044–1053.
- Tezel, A., Taggart, M., Koskela, L., Tzortzopoulos, P., Hananoe, J., Kelly, M. (2019). Lean Construction and BIM in Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) in Construction: a Systematic Literature Review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 47(2), 186–201.
- Torrisi, D. (2018). *Analisi parametrica del comfort in un modulo abitativo sperimentale in pannelli di cartone ondulato*. Master Degree Dissertation, Università di Catania (Unpublished)
- TU Darmstadt (2014). *BAMP Building with Paper*. [Online] <https://www.buildingwithpaper.com/> (Accessed 15th January 2022)
- Turchini, G. (2013). Produzione industriale personalizzata. *Arketipo*, 71, 102–107.
- Turner, C. J., Oyekan, J., Stergioulas, L., Griffin, D. (2021). Utilizing Industry 4.0 on the Construction Site: Challenges and Opportunities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(2), 746–756.
- Vaccari, M., & Sassi, P. (2015). Environmental Assessment of Cardboard as a Building Material. *IASS WORKING GROUPS 12 + 18 International Colloquium 2015 “Bio-Based and Bio-Inspired Environmentally Compatible Structures”* [Online] Available at: [http://files/279/Vaccari i Sassi - 2015 - Environmental Assessment of Cardboard as a Building Material](http://files/279/Vaccari%20i%20Sassi%20-%202015%20-%20Environmental%20Assessment%20of%20Cardboard%20as%20a%20Building%20Material.pdf) https://www.researchgate.net/publication/332119762_Environmental_Assessment_of_Cardboard_as_a_Building_Material (Accessed 17th January 2021)
- Vale, B. (1995). *Prefab. A History of the UK Temporary Housing Programme*. Routledge.
- VAN Voluntary Architects Network (2010). *Making Architecture, Nurturing People: From Rwanda to Haiti*. Inax Publishing.
- Wang, M., Wang, C. C., Sepasgozar, S., Zlatanova, S. (2020). A Systematic Review of Digital Technology Adoption. *Buildings*, 2020(10), 1–29.
- You, Z., Feng, L. (2020). Integration of Industry 4.0 Related Technologies in Construction Industry: A Framework of Cyber-Physical System. *IEEE Access*, 8, 122908–122922.
- Zabihi, H., Habib, F., Mirsaeedie, L. (2013). Definitions, Concepts and New Directions in Industrialized Building Systems (IBS). *KSCIE Journal of Civil Engineering*, 17(6), 1199–1205.
- Zaffagnini, M. (1981). *Progettare nel processo edilizio. La realtà come scenario per l’edilizia residenziale*. Luigi Parma.
- Zanelli, A., Giurdanella, V., Superbi, G., Viscuso, S. (2010). *Assemblage, la libertà costruttiva. Il progetto d’abitazione mediante elementi industriali e kit personalizzabili*. Il Sole 24 Ore.

Pt. III Il progetto CARES

- Abdalla, J. A., Law, K. H. (2014). A Framework for Building Energy Model to Support Energy Performance Rating and Simulation. *Computing in Civil and Building Engineering*, 227–233.
- Alwan, Z., Nawarathna, A., Ayman, R. (n.d.). *Challenges in Energy Analysis of BIM based Building Projects During Early Design Phase*.
- An, S., Martinez, P., Al-Hussein, M., Ahmad, R. (2020). BIM-based decision support system for automated manufacturability check of wood frame assemblies. *Automation in Construction*, 111(June).
- ANCE (2019). *Osservatorio congiunturale sull'industria delle costruzioni*. [Online] Available at: <http://www.ance.it/docs/docDownload.aspx?id=53355> (Accessed: 05th december 2021)
- ARL Arredoline Costruzioni. (n.d.). *Progetto SY4.0. Il cantiere intelligente*. [Online] <https://arlcostruzioni.it/progetto-sy4-0/> (Accessed: 20th december 2021)
- Asl, M. R., Bergin, M., AdamMenter, Yan, W. (2014). BIM-based Parametric Building Energy Performance MultiObjective Optimization. *32nd ECAADe Conference*, 224, 10.
- Azhar, S., Brown, J., & Farooqui, R. (2009). BIM-based Sustainability Analysis: An Evaluation of Building Performance Analysis Software. *Proceedings of the 45th ASC Annual Conference, January*, 1–4.
- Bianconi, F., Filippucci, M., Buffi, A. (2019). Automated Design and Modeling for Mass-customized housing. A Web-based Design Space Catalog for Timber Structures. *Automation in Construction*, 103(January), 13–25.
- Bologna, R., Terpolilli, C. (2005). *Emergenza del progetto. Progetto dell'emergenza. Architetture con-temporaneità*. 24 Ore Cultura.
- Bolpagni, M. (2021). *Nuova norma UNI EN 17412-1: dai LOD al Livello di Fabbisogno Informativo*. Ingenio [Online] <https://www.ingenio-web.it/29519-nuova-norma-uni-en-17412-1-dai-lod-al-livello-di-fabbisogno-informativo> (Accessed: 20th december 2021)
- Bracht, M. K., Melo, A. P., Lamberts, R. (2021). A Metamodel for Building Information Modeling-Building Energy Modeling Integration in Early Design Stage. *Automation in Construction*, 121(September), 103422.
- BuildingSMART Italia (n.d.). *Industry Foundation Classes (IFC)*. [Online] <https://www.buildingsmartitalia.org/standard/standard-bs/industry-foundation-classes-ifc/> (Accessed: 20th december 2021)
- Farzaneh, A., Monfet, D., Forgues, D. (2019). Review of using Building Information Modeling for building energy modeling during the design process. *Journal of Building Engineering*, 23(January), 127–135.
- Gao, H., Koch, C., Wu, Y. (2019). Building information modelling based building energy modelling: A review. *Applied Energy*, 238(January), 320–343.
- Hong, S. (2020). *Geometric Accuracy of BIM-BEM Transformation Workflows: Bridging the State-of-the-Art and Practice*. Master Degree Dissertation, Carleton University.
- Nawari, N. (2012). BIM Standardization and Wood Structures. *Computing in Civil Engineering*, 293–300.
- Nawari, N., Chichugova, T., Mansoor, S., Delfin, L. (2014). BIM in structural design education. *Computing in Civil and Building Engineering - Proceedings of the 2014 International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, 2143–2150.
- Nik-Bakht, M., Lee, J., & Dehkordi, S. H. (2021). Bim-based reverberation time analysis. *Journal of Information Technology in Construction*, 26(July 2020), 28–38.

- Pozzoli, S. (2018). *Autodesk Revit 2019. Guida completa per la progettazione BIM*. Tecniche Nuove.
- Ramaji, I. J., Messner, J. I., Mostavi, E. (2020). IFC-Based BIM-to-BEM Model Transformation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 34(3).
- Ren, R., Zhang, J., Dib, H. N. (2018). BIM Interoperability for Structure Analysis. *ASCE Construction Research Congress, ASCE, Reston, VA*, 470–479.
- Rudella, E. (2018). *Il BIM per le strutture in legno prefabbricate: interoperabilità tra modellazione, analisi strutturale e produzione industriale*. Master Degree Dissertation, Università degli Studi di Padova. (Unpublished)
- Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S., Girolami, M. (2020). Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*, 1(6).
- Softlab. (2021). *Calcolo strutturale in legno con Iperspace BIM. Calcolo agli elementi finiti BIM oriented*. Grafill.
- Sušnik, M., Tagliabue, L. C., Cairoli, M. (2021). BIM-based energy and acoustic analysis through CVE tools. *Energy Reports*, 7, 8228–8237.
- Wu, C., Clayton, M. J. (2013). BIM-Based Acoustic Simulation Framework. *30th International Conference of CIB W78, June*, 99–108.
- Zanelli, A. (2006). Temporaneo per necessità, temporaneo per scelta. *Il Progetto Sostenibile*, 9, 4–11.

Normativa di riferimento

- **UNI 8289:1981** Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione.
- **UNI 8290-2:1983** Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi dei requisiti.
- **UNI 11277:2008** Sostenibilità in edilizia. Esigenze e requisiti di eco-compatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di nuova edificazione e ristrutturazione.
- **UNI 11337-4: 2017** Edilizia e opere di ingegneria civile- Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni - Parte 4: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti.
- **D.M. 11 aprile 2013**, Norme tecniche-quadro, contenenti gli indici minimi e massimi di funzionalità urbanistica, edilizia, anche con riferimento alle tecnologie in materia di efficienza e risparmio energetico e produzione da fonti energetiche rinnovabili, e didattica indispensabili a garantire indirizzi progettuali di riferimento adeguati e omogenei sul territorio nazionale.
- **D.M. 18 dicembre 1975**, Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica.
- **D.M. 26 agosto 1992**, Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica.
- **D.M. 14 giugno 1989 n.236**, Prescrizioni tecniche necessarie a garantire l'accessibilità, l'adattabilità e la visitabilità degli edifici privati e di edilizia residenziale pubblica, ai fini del superamento e dell'eliminazione delle barriere architettoniche.
- **D.Lgs. 3 marzo 2011 n.28**, Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.
- **D.M. 26 giugno 2015**, Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.
- **D.M. 11 ottobre 2017**, Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici.
- **D.M. 14 gennaio 2008**, Norme tecniche sulle Costruzioni.
- **D.Lgs. 30 aprile 1992 n.285**, Nuovo Codice della Strada.

Sitografia

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA)

<https://www.enea.it/it>

ANSA

<https://www.ansa.it/>

Archicart®

<https://www.archicart.com/>

Artribune

<https://www.artribune.com/>

Associazione Nazionale Costruttori Edili (ANCE)

<https://ance.it/>

Autodesk

<https://www.autodesk.it/>

Bosetti & Gatti

<https://www.bosettiegatti.eu/>

Britannica

<https://www.britannica.com/>

buildingSMART (Italia)

<https://www.buildingsmart.org/>

Buildoffsite

<https://www.buildoffsite.com/>

Commissione Europea

https://ec.europa.eu/info/index_en

Commissione Europea, Horizon Europe

https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en

Confederation of European Paper Industries (Cepi)

<https://www.cepi.org/>

Consorzio nazionale recupero e riciclo degli imballaggi a base cellulosica (Comieco)

<https://www.comieco.org/>

CRESME

<http://www.cresme.it/>

Dipartimento della Protezione Civile

<https://www.protezionecivile.gov.it/it/>

Divisare

<https://divisare.com/>

Edilportale

<https://www.edilportale.com/>

Ellen MacArthur Foundation

<https://ellenmacarthurfoundation.org/>

Fondazione Agnelli

https://www.fondazioneagnelli.it/?doing_wp_cron=1643020503.6065630912780761718750

INDIRE

<https://www.indire.it/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

<https://www.ipcc.ch/>

International Code Council (ICC)

<https://www.iccsafe.org/>

International Energy Agency (IEA)

<https://www.iea.org/>

Lucense

<https://lucense.it/>

Ministero della Transizione Ecologica (MITE)

<https://www.mite.gov.it/>

Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR)

<https://www.miur.gov.it/web/guest/>

Ministero dello Sviluppo Economico (MISE)

<https://www.mise.gov.it/index.php/it/>

Modular and Portable Building Association

<https://mpba.biz/>

Modular Building Institute

<http://modular.org/>

Norme UNI

<https://www.uni.com/>

NSW Government Infrastructure Strategy 2018-2038

<https://www.nsw.gov.au/nsw-infrastructure-strategy-2018-2038#:~:text=The%20NSW%20State%20Infrastructure%20Strategy%202018%E2%80%932038%20sets%20out%20the,Greater%20Sydney%20Region%20Plan>

OECD

<https://www.oecd.org/>

ONU (Italia)

<https://unric.org/it/>

OXFAM (Italia)

<https://www.oxfamitalia.org/>

Regione Emilia Romagna

<https://www.regione.emilia-romagna.it/>

Regione Toscana

<https://www.regione.toscana.it/>

Save The Children (Italia)

<https://www.savethechildren.it/>

Sustainable Development Goals (SDGs)

<https://sdgs.un.org/goals>

TED

<https://www.ted.com/>

Toyota Home

<https://www.toyotahome.co.jp/>

UNHCR (Italia)

<https://www.unhcr.org/it/>

UNICEF (Italia)

<https://www.unicef.it/>

Victorian School Building Authority, Permanent Modular School Building Program (PMSB)

<https://www.schoolbuildings.vic.gov.au/permanent-modular-school-buildings-program>

Wikimedia Commons

https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page

Elenco delle appendici

Costituiscono parte integrante della ricerca **CARES | CArdboard RElocatable School unit** i seguenti materiali, forniti come appendice alla Tesi:

Cartella: PAN		
Nome file	Estensione file	Descrizione e note
PAN_SW_V	.rfa	Famiglia di pannello prefabbricato verticale
PAN_SW_VS	.rfa	Famiglia di pannello prefabbricato verticale sagomato
PAN_SW_O	.rfa	Famiglia di pannello prefabbricato orizzontale
Cartella: PRJ		
PRJ_MOD	.rte	Modello di progetto con modellazione dell'unità scolastica CARES
PRJ_CS-EST	.rfa	Famiglia di massa: modellazione intorno (caso applicativo Scuola "J.Piaget")
Cartella: PROF		
PROF	.rfa	Famiglia di profilo, nidificata nelle famiglie PAN_SW_V/VS/O
PROF_SAG	.rfa	Famiglia di profilo, nidificata nelle famiglie PAN_SW_V/VS/O
Cartella: PSTR		
PSTR_SW	.rfa	Famiglia di piastre di ancoraggio
Cartella: INF		
INF_DAV	.rfa	Famiglia di davanzale per infisso
INF_DR	.rfa	Famiglia porta (Credits: Hörmann KG da bimobject.com)
INF_MAN	.rfa	Famiglia di maniglia per finestra, nidificata in famiglia INF_WND
INF_SER	.rfa	Famiglia di serramento per finestra, nidificata in famiglia INF_WND
INF_SER_DET_O	.rfa	Elemento grafico di sostituzione (dettaglio pianta), nidificato in INF_WND
INF_SER_DET_V	.rfa	Elemento grafico di sostituzione (dettaglio sezione), nidificato in INF_WND
INF_SER_TF	.rfa	Famiglia di telaio fisso, nidificata nella famiglia INF_SER
INF_SER_TM	.rfa	Famiglia di telaio fisso, nidificata nella famiglia INF_SER
INF_WND	.rfa	Famiglia di finestra
Cartella: PRM		
PRM	.xlsx	Elenco dei parametri
PRM_PRJ	.dwg	Progetto della parametrizzazione dei dati: scenari di produzione graficizzati
PAN_SW	.txt	Parametri condivisi: parametri delle famiglie PAN_SW_V/VS/O
PROF	.txt	Parametri condivisi: parametri delle famiglie PROF, PROF_SAG
PSTR	.txt	Parametri condivisi: parametri della famiglia PSTR_SW
MAT	.txt	Parametri condivisi: parametri dei materiali
Cartella: MAT		
MAT_Libreria	.adsklib	Libreria dei materiali

Ringraziamenti

Giunta alla fine di questo percorso, i miei più sinceri ringraziamenti vanno a tutti coloro che ne sono stati parte e lo hanno reso possibile.

Alle mie relatrici, Prof.ssa Paola Gallo e Prof.ssa Rosa Romano, per la fiducia e la possibilità di intraprendere questo viaggio; per la competenza, la professionalità e la pazienza con cui mi hanno guidato durante questi anni di ricerca; per gli incontri, la franchezza, le divergenze, le esortazioni, le idee e i consigli, perché adesso vedo i limiti come prospettive da cui guardare più avanti.

All'Ing. Dario Distefano e all'Ing. Nicola Timpanaro, per aver arricchito questo lavoro con fiducia ed entusiasmo, per aver trovato il tempo per il confronto, per aver ascoltato e risolto infinite domande e insicurezze.

A tutto il gruppo di Professionisti di Archicart, Dario, Nicola, Mario, Chiara, Alberto, Luca, per le attenzioni, il calore e la gentilezza con cui mi hanno accolto e fatto sentire a casa; per la competenza, la tenacia e la passione con cui alimentano questa "idea leggera" che è stata per me fonte continua di scoperta, stupore e ammirazione.

A tutti i Professori, Ricercatori e Professionisti che hanno dedicato tempo al confronto, affinché potessi fare domande, comprendere, rimettere tutto in discussione per trovare infine una nuova consapevolezza o conoscenza.

Ai Ricercatori del Centro ABITA e ai Dottorandi incontrati durante questo percorso, per averne condiviso le paure e gli equilibri instabili.

A Maria Vittoria, Elisa e Federica, prime e fondamentali lettere dell'alfabeto, per il mistero di esserci tenute mentre diventavamo grandi.

A Maria Vittoria, Camilla e Elena, per aver progettato insieme un'avventura e, chissà, un pezzetto di futuro.

A Ilaria e Vittoria, per essere state casa, conforto e spensieratezza anche nei giorni più difficili.

Ai miei genitori, a nonna e Elena, per aver accettato la mia incostanza, le assenze e le partenze, per essere sempre la sicurezza quando mi perdo.

A chi arriva per ultima, a Ginevra. Non so immaginare chi sarai, ma mi auguro per te le più belle scoperte che questo mondo ha da offrire.

I materiali digitali prodotti in
Appendice alla Tesi sono accessibili
online inquadrando il **QR Code**



