

Industrializzazione edilizia e innovazione tecnologica

Il ruolo dei modern methods of construction nel contesto europeo



Alessandro Costabello

Politecnico di Torino

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea magistrale in Architettura Costruzione Città

A.A. 2024/2025

Tesi di Laurea Magistrale

Industrializzazione edilizia e innovazione tecnologica

Il ruolo dei Modern Methods of Construction nel contesto europeo

Relatore: Docente Guido Callegari

Candidato: Alessandro Costabello S319306

INDICE

Abstract	8
Introduzione	12
Parte 1 / Circolarità e architettura: il cambiamento in atto relativo ai modelli di sviluppo e al settore delle costruzioni	16
1.1 Economia circolare e architettura: un cambiamento nei modelli di sviluppo	18
1.2 Fondamenti teorici e strumenti operativi dell'economia circolare	34
1.3 L'impatto del modello di sviluppo lineare e del settore delle costruzioni	42
1.4 Modern methods of construction e architettura off-site: possibilità di sviluppo circolare	50
1.5 Il ruolo dell'industrializzazione nei sistemi costruttivi prefabbricati leggeri	62
1.6 I sistemi costruttivi prefabbricati in legno e strategie off-site	74
Parte 2 / Politiche, programmi e applicazioni: catalizzatori della circolarità e dell'innovazione industrializzata nell'architettura	84
2.1 Le istituzioni internazionali nella costruzione del quadro per la transizione circolare	86
2.2 Dalla cornice internazionale all'azione europea e le strategie operative	94
2.3 Applicazioni dei principi di circolarità e di strategie off-site in differenti contesti europei	106

Parte 3 / Industrializzazione architettonica: evoluzione dei sistemi costruttivi e le conseguenze sulla filiera edilizia	144
3.1 Sistemi costruttivi prefabbricati leggeri e strategie Off-site	146
3.2 Impatti sulla filiera: Progettazione, produzione, impiantistica e connessioni.	156
3.3 Progetto architettonico e produzione industrializzata: sistemi costruttivi e Lean Construction	164
3.4 Ruolo del progettista in un progetto architettonico che segue i principi Off-Site	174
Conclusioni	182
Bibliografia	186
Fonti consultate	190
Sitografia	200

ABSTRACT

La tesi analizza come l'integrazione tra **economia circolare** e **industrializzazione** dei processi edilizi possa **supportare la transizione sostenibile** del settore delle costruzioni in Europa, alla luce di recenti iniziative politiche e programmi di sviluppo come il **Green Deal**, il **Circular Economy Action Plan** e il **New European Bauhaus**. Questi programmi rappresentano impulsi politici e strategici che orientano il settore delle costruzioni verso la **decarbonizzazione**, la **riduzione degli rifiuti** e l'impiego di **materiali bio-based**.

Il lavoro di ricerca nella tesi si struttura combinando: la revisione critica della letteratura di settore e delle politiche europee, l'analisi comparativa di approcci e standard applicati ai **Modern Methods of Construction (MMC)** e dell'**architettura Off-Site**, l'approfondimento tecnico sui **sistemi prefabbricati in legno ingegnerizzato**. La valutazione si fonda su criteri coerenti con i modelli dell'economia circolare: progettazione per il disassemblaggio, **DfD**, e per fabbricazione e montaggio, **DfMA**, **tracciabilità dei materiali** tramite **passaporti digitali** e integrazione digitali attraverso software **BIM**.

Lo studio intende dimostrare che i MMC e l'Off-Site, se supportati da **strumenti tecnologici avanzati**, **standardizzazione** dei componenti, **digitalizzazione** della filiera e utilizzo di **materiali bio-based**, rappresentano **strumenti efficaci** per allinearsi alle direttive europee. Essi permettono infatti di ridurre tempi di cantiere e variabilità qualitativa, diminuire rifiuti e consumi di risorse grazie alla **produzione in stabilimento** e a una logistica ottimizzata, nonché di favorire manutenzione, riuso e aggiornamento dei componenti attraverso **soluzioni modulari e connessioni reversibili**.

Tra i diversi sistemi prefabbricati analizzati, la ricerca pone l'attenzione sul **legno ingegnerizzato** come materiale oggi centrale nel dibattito edilizio contemporaneo. Le sue qualità, che spaziano tra sostenibilità, capacità di sequestro di carbonio, elevata **propensione alla prefabbricazione**, precisione dimensionale e **compatibilità con i principi DfMA e DfD**, lo rendono un'opzione favorita per soddisfare gli obiettivi europei di decarbonizzazione e circolarità.

La tesi si propone quindi come quadro operativo che, a partire da un inquadramento teorico sui principi dell'economia circolare e sulle sfide del settore delle costruzioni, approfondisce il ruolo dei MMC e dell'architettura Off-Site come strumenti attuativi della transizione, integrandoli con linee guida per sistemi modulari in legno. L'obiettivo è dimostrare come l'**industrializzazione edilizia**, orientata alla circolarità, possa tradurre le strategie europee in **pratiche progettuali e produttive** verificabili, delineando un paradigma replicabile per la trasformazione sostenibile dell'ambiente costruito.

INTRODUZIONE

Ambito tesi:

La tesi si pone l'obiettivo di analizzare il cambiamento che sta interessando il settore delle costruzioni, investigando le **trasformazioni nei sistemi costruttivi e produttivi**, le sfide che ne derivano e il ruolo delle metodologie dei **Modern Methods of Construction** e **l'architettura Off-Site**.

L'architettura ed i suoi paradigmi progettuali lineari, che l'hanno costituita fino ad ora, risultano ormai insostenibili in un contesto caratterizzato da emergenze ambientali, instabilità economica e mutamenti sociali. Serve allora riconsiderare i paradigmi di sviluppo, avviando una **transizione verso** quelli di **un'economia circolare**, servendosi proprio dei MMC e dell'Off-Site: strumenti concreti per supportare la transizione, attraverso **l'industrializzazione dei processi, la razionalizzazione dei materiali e l'ottimizzazione energetica**.

Da queste necessità sono state sviluppate strategie europee, come il **Green Deal, il New European Bauhaus e l'Agenda 2030**, come guida verso la **decarbonizzazione**, la riduzione dei rifiuti e un uso consapevole dei materiali. In particolare, ponendo attenzione ai **sistemi prefabbricati in legno ingegnerizzato**, capaci di coniugare efficienza industriale precisione dimensionale e compatibilità con strategie di progettazione per il disassemblaggio, DfD, e per la produzione, DfMA.

Il legno ingegnerizzato rappresenta una soluzione promettente per poter sostenere gli obiettivi europei di decarbonizzazione e neutralità climatica, risultando adatto per un'integrazione efficiente tra **innovazione tecnologica e sostenibilità ambientale**. Questo focus avverrà con la consapevolezza che i sistemi costruttivi in legno possono essere una delle risposte possibili, né l'unica e né la definitiva.

In conclusione, la tesi si proporrà di mostrare come l'industrializzazione architettonica, se orientata alla circolarità e ai suoi principi, possa tradurre le politiche europee di recente emanazione in **pratiche progettuali concrete** e di come le strategie **Off-Site** e i sistemi costruttivi prefabbricati in legno siano risposte promettenti alle azioni di decarbonizzazione per il raggiungimento della neutralità climatica.

Obiettivo tesi:

L'elaborato finale si propone di indagare come l'adozione di strategie Off-Site, l'industrializzazione dei processi costruttivi e produttivi e l'impiego di prodotti ingegnerizzati possano essere una risposta e un contributo alla **transizione circolare nel settore delle costruzioni**. L'obiettivo è mostrare come questi **strumenti, integrati a principi circolari**, siano in grado di **supportare un cambiamento di paradigma** che va oltre alla mera innovazione tecnologica, configurandosi come un **modello sistemico** in grado di ridurre gli impatti ambientali, gli sprechi e i consumi energetici.

La ricerca si struttura su due punti essenziali: l'**analisi critica di casi studio e buone pratiche di architetture circolari**, individuate all'interno di progetti e politiche europee, sviluppatasi da esigenze di mercato, sperimentazioni autonome o come risposte a vincoli sociali, economici e tecnici imposti. Dall'altro l'**analisi delle ripercussioni** che queste comportano **nel settore delle costruzioni**, in particolar modo delle **ricadute teoriche e pratiche** delle pratiche di industrializzazione dei sistemi costruttivi. L'unione di questi punti permette di coniugare **riflessioni teoriche ed esperienze progettuali**, con l'intento di delineare un quadro operativo per una trasformazione sostenibile dell'ambiente costruito.

Esperienze a fondamento della tesi:

La tesi è frutto delle **esperienze** che ho intrapreso durante il percorso accademico. Il mio interesse verso i **temi legati all'architettura Off-Site** è stato approfondito durante tre esperienze significative: le attività di borsista nel corso **"Progetto di Architettura Off-Site"** del professore Guido Callegari, l'esperienza di tirocinio curriculare presso l'azienda **WolfHaus Italia** e durante il Progetto di ricerca UROP **"Circular Design Polito Lab"**.

L'interesse verso i temi nasce dopo aver frequentato il corso "Progetto di Architettura Off-site" del professore Guido Callegari, corso nel quale ho potuto ricoprire il **ruolo di borsista** l'anno seguente. Durante questa esperienza ho potuto seguire

le esercitazioni degli studenti e analizzare i risultati del corso. Da questi ho potuto approfondire come le **applicazioni delle strategie Off-Site** trovassero impiego in differenti contesti con **soluzioni eterogenee** in funzione di ambiti differenti. Durante queste esperienze ho avuto modo di approfondire casi studio significativi che, all'interno di questa tesi, sono stati presentati per fornire un'applicazione pratica dello sviluppo tecnologico e gli approcci progettuali inerenti ai processi di industrializzazione dei sistemi costruttivi prefabbricati.

Per comprendere a pieno l'industrializzazione dei processi all'interno del settore architettonico ho intrapreso un **tirocinio curricolare nell'azienda WolfHaus** a Vipiteno, azienda leader nel settore della prefabbricazione di sistemi lignei in Italia. Questa esperienza mi ha permesso di conoscere le dinamiche relative alla **progettazione e produzione di sistemi costruttivi prefabbricati in legno Off-Site**. Il livello tecnologico del sistema produttivo e il grado di progettazione digitale mi hanno permesso di apprezzare cosa significhi a livello pratico lavorare con sistemi industrializzati. I risultati di questa esperienza mi hanno permesso di approfondire questi temi e all'interno della tesi la mia esperienza sarà la **chiave di lettura** per alcuni temi legati alla **progettazione, produzione e industrializzazione di componenti e sistemi prefabbricati** con sistemi costruttivi lignei.

L'ultima esperienza fatta durante i corsi magistrali è stata la partecipazione, con il ruolo di studente collaboratore alla ricerca, **al programma UROP nel progetto di ricerca "Circular Design Polito Lab"** promosso dai docenti del dipartimento DAD del Politecnico di Torino Guido Callegari e Riccardo Palma. Come studente ho avuto la possibilità di partecipare attivamente alla ricerca, in collaborazione con i docenti e i dottorandi, come studente ricercatore nel progetto che prevede la **realizzazione di un'architettura sperimentale** per le attività di didattica e di ricerca situato a Cambiano. Questo progetto mi ha permesso di affrontare sfide progettuali reali, confrontarmi con i temi del riuso e del recupero dei materiali all'interno di una filiera locale e di lavorare in sinergia con una rete di attori a livello territoriale. I temi, trasposti all'interno della tesi, mi danno la possibilità di affrontare argomenti complessi come questo per mostrare come l'**economia circolare** comporti un **cambio di paradigma sistematico** nel settore delle costruzioni.

Struttura tesi:

Le esperienze intraprese sono fondamento e chiave di lettura del lavoro che verrà suddiviso in tre parti.

La prima parte è relativa l'**inquadramento dell'economia circolare e dei suoi principi** come bussola per il cambiamento sistemico in atto nei processi di sviluppo. Questo permette di analizzare il **ruolo della circolarità** all'interno dell'architettura e nell'applicazione delle **metodologie dei Modern Methods of Construction** come risposta a questi principi. Viene poi inquadrata l'**architettura Off-Site** come strategia dei MMC e infine i sistemi costruttivi prefabbricati in legno come sistema che incarna i principi circolari nell'architettura per il raggiungimento degli obiettivi di circolarità e decarbonizzazione posti dall'Unione Europea.

La seconda parte illustra il **quadro normativo** che ha **permesso e incentivato il cambiamento** dei modelli di sviluppo e l'applicazione di questi principi nel settore delle costruzioni attraverso i **MMC**, l'**architettura Off-Site** e l'utilizzo di **materiali bio-based** come il legno ingegnerizzato. Viene poi analizzato come i problemi relativi all'abitare, le politiche e i programmi europei e nazionali abbiano portato ad un'**applicazione eterogenea di soluzioni architettoniche** in contesti e ambiti differenti.

La terza parte approfondisce le **conseguenze pratiche e teoriche** relative al cambiamento in atto. Per comprendere il significato delle applicazioni pratiche è necessario comprendere come si sia arrivati a queste e quali **implicazioni** ha questo nella **filiera edilizia**. Il passaggio da prefabbricazione pesante a leggera, la scelta dei materiali, le implicazioni sui processi progettuali e produttivi dati dall'industrializzazione architettonica e il ruolo dell'architetto in questo cambiamento sono concetti necessari per comprendere il **valore delle applicazioni progettuali** delle metodologie MMC e delle strategie Off-Site in progetti architettonici.

CIRCOLARITA' E ARCHITETTURA: IL CAMBIAMENTO IN ATTO RELATIVO AI MODELLI DI SVILUPPO E AL SETTORE DELLE COSTRUZIONI

PARTE 1 /

Il ruolo dell'economia circolare e dei suoi principi nel settore delle costruzioni come cambiamento sistemico del paradigma di sviluppo dell'architettura

1.1 ECONOMIA CIRCOLARE E ARCHITETTURA: UN CAMBIAMENTO NEI MODELLI DI SVILUPPO

Nel 2025, in uno scenario caratterizzato dalle sfide ambientale e sociali sempre più complesse, **l'economia circolare** si configura come uno dei principali paradigmi sistemici in grado di **orientare la transizione verso un modello di sviluppo circolare** anche nel settore dell'architettura e delle costruzioni. Questo paradigma trova supporto nelle strategie e negli obiettivi dell'Unione Europea delineati nelle strategie di crescita come il **Green Deal Europeo**, il **Circular Economy Action Plan** e **l'Agenzia CINEA**, *Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency*. Il *Green Deal*, tramite i suoi obiettivi di neutralità climatica entro il 2050, ha posto le basi per lo sviluppo del primo pacchetto del 2020 per accelerare la transizione, prevista nel *Piano d'azione per l'economia circolare*, verso l'applicazione dei principi di circolarità.¹ Il *Circular Economy Action Plan* evidenzia come l'edilizia sia un settore chiave in cui intervenire per migliorare l'efficienza delle risorse e il riuso dei materiali. L'Agenzia CINEA sostiene il Green Deal attraverso l'attuazione efficiente ed efficace dei programmi promossi che finanziano l'economia circolare e le tecnologie innovative nel settore delle costruzioni.²

Questo insieme di strategie e piani di sviluppo supportano una transizione verso i principi della circolarità, paradigma in opposizione al modello lineare tradizionale basato sulla sequenza “estrai, produci, consuma, smaltisci”³. Come affermato dalla fondazione Ellen MacArthur l'economia circolare è **“un sistema in cui i materiali non diventano mai rifiuti e la natura si rigenera.”**⁴

In un modello di sviluppo che segue i principi della circolarità, emerge un sistema rigenerativo in cui **i materiali e i prodotti** vengono pensati sin dalla progettazione per durare nel tempo, essere **mantenuti in circolazione** attraverso processi come la manutenzione, il riutilizzo, la ristrutturazione, la rigenerazione, il riciclo e il compostaggio, ma anche di reintegrarli in nuovi cicli di vita, minimizzando il consumo di risorse e la produzione di rifiuti.

¹ Parlamento Europeo. Economia circolare: in che modo l'UE intende realizzarla entro il 2050. Consultazione 04/09/2025. <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20210128STO96607/economia-circolare-in-che-modo-l-ue-intende-realizzarla-entro-il-2050>

² European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency. (s.d.). About us. In CINEA – European Commission. Ultima consultazione 04/09/2025 < https://cinea.ec.europa.eu/index_en?prefLang=it >

³ <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/the-circular-economy-explained>

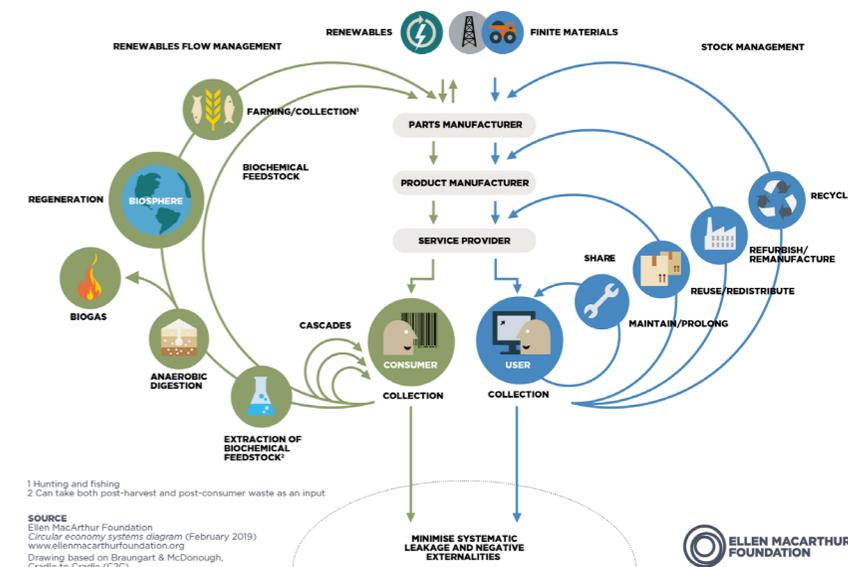
⁴ <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>

“Un'economia pensata per potersi rigenerare da sola [...] dove i flussi di materiali sono di due tipi: quelli biologici, in grado di essere reintegrati nella biosfera, e quelli tecnici, destinati a essere rivalorizzati senza entrare nella biosfera.”

- Ellen MacArthur Foundation, 2012

“Il diagramma a farfalla: visualizzare l'economia circolare”

Fonte: Ellen MacArthur Foundation



L'economia circolare rappresenta un'evoluzione tecnica della sostenibilità e una **trasformazione sistemica e multi livello del sistema produttivo e progettuale**. Il suo obiettivo principale è **disaccoppiare la crescita economica dal consumo di risorse finite**, promuovendo un modello in cui il valore dei materiali e dei prodotti venga mantenuto il più a lungo possibile all'interno del sistema economico. Si tratta quindi di **un cambiamento**, che coinvolge non solo l'industria, ma anche il modo in cui si concepiscono i prodotti, l'ambiente costruito e i territori, invitando a un **ripensamento profondo dei cicli di vita** degli oggetti costruiti⁵.

L'economia circolare per perseguire questi obiettivi fa riferimento a tre principi fondamentali che pongono le basi per l'avvio di un sistema circolare:

- **Eliminare** gli sprechi e l'inquinamento
- **Avviare** un processo circolare per prodotti e materiali
- **Rigenerare** la natura

Seguire questi principi comporta una **differente gestione delle risorse**, una strategia di utilizzo dei prodotti e la **gestione del fine vita** dei prodotti.

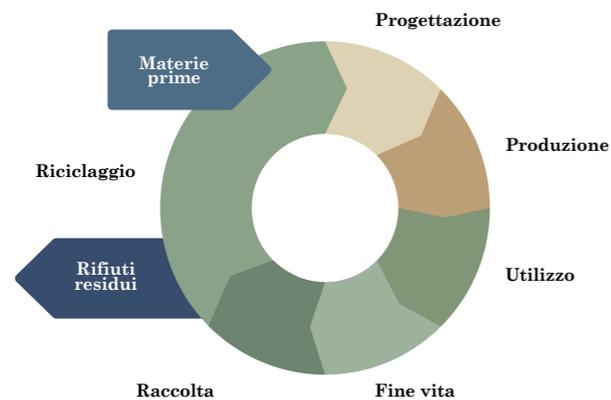
⁵ Stahel, W. R. (2019). *The Circular Economy: A User's Guide*. Routledge.

Per perseguire questi obiettivi risulta necessario legare i principi della circolarità al settore delle costruzioni in quanto “il nostro ambiente costruito, composto da edifici, strade e infrastrutture, utilizza quasi la metà dei materiali estratti a livello globale ogni anno e contribuisce in modo significativo alle emissioni di gas serra. Le proiezioni attuali, stimano che da qui al 2060, in tutto il mondo, verrà costruito ogni settimana l'equivalente della città di Parigi”⁶. La trasposizione di questi principi nel settore delle costruzioni e nell'ambiente costruito in generale significa superare la logica del progetto “usa e getta”⁷ legata al modello lineare, che vede l'edificio come un oggetto statico e inerte, per abbracciare un approccio che lo vede come un **sistema aperto, adattabile e reversibile**, in linea con la concezione di modello di sviluppo circolare.

Modello di sviluppo lineare



Modello di sviluppo circolare



“Differenza tra il modello lineare focalizzato sulla progettazione per una fine del ciclo di vita e il modello circolare di utilizzo dei materiali nell'edilizia focalizzato sulla progettazione per più cicli di vita e sulle opzioni di riutilizzo dei materiali”.
Durmisevic

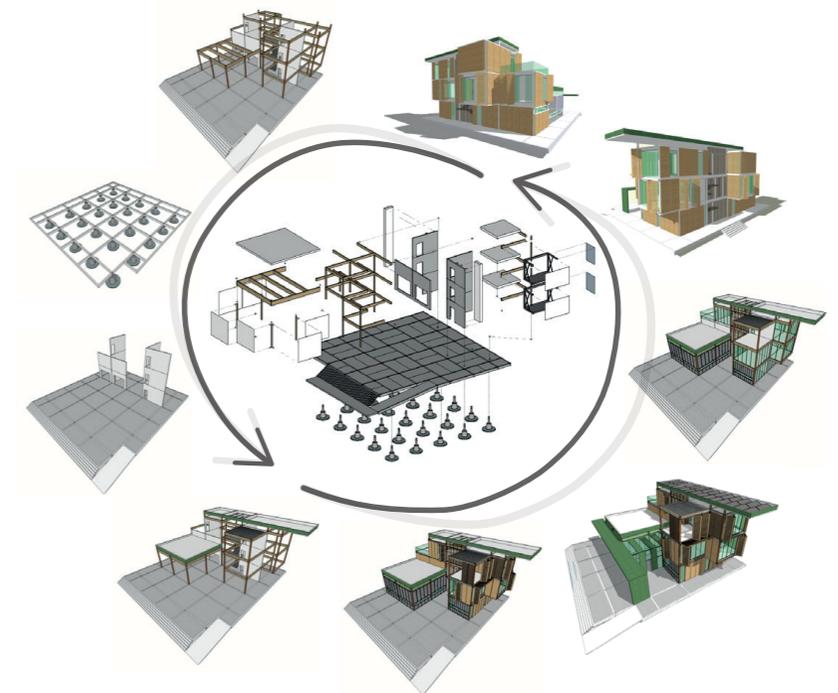
Fonte: Elaborazione dell'Autore, basata su Durmisevic Elma, 2006.

⁶ <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/built-environment/overview>
⁷ Daniele Chiarella, Hemant Ahlawat, Jukka Maksimainen, and Sebastian Reiter, 2025 “How circularity can make the built environment more sustainable”. McKinsey & Company

BAMB - Buildings as Material Banks

Il progetto europeo BAMB, finanziato dal programma Horizon 2020, ha avuto l'obiettivo di sviluppare strumenti e strategie per un'applicazione concreta dei principi circolari nel settore delle costruzioni. La sua visione era quella di assumere gli edifici come banche di materiali. Gli edifici, assunti come depositi temporanei di risorse, permettono il recupero, riutilizzo e rimmisione in nuovi cicli produttivi delle componenti edilizie a fine vita. Il suo lavoro si è sviluppato con strumenti come il Material Passport e un protocollo di progettazione reversibile.

La logica che vede l'edificio come un sistema aperto adattabile e reversibile ha portato ad esperienze a livello europeo nelle quali emergono differenti sfumature della circolarità. Essa non viene intesa solamente come una strategia di riduzione degli sprechi o di riciclo dei materiali, ma come una ridefinizione dell'edificio in quanto “**banche di materiali**”⁸. Questo approccio è portato avanti dal progetto europeo BAMB, il quale propone un approccio per ridurre i rifiuti da costruzione e demolizione. Per raggiungere questi obiettivi è stata collaudata una **metodologia circolare standardizzata** per la progettazione di edifici che permette di considerare il recupero, la riparazione e il riutilizzo di componenti edilizi. Questo è possibile grazie al **protocollo di progettazione reversibile** sviluppato dai partner del progetto che consente ai professionisti della filiera edilizia di “implementare le strategie di progettazione reversibili in una fase di costruzione e ristrutturazione”. Il progetto ha sviluppato il **Material Passport** per supportare il professionista e questo strumento funge da “sportello unico per le informazioni sui materiali a supporto del processo decisionale circolare”⁹.



Applicazione dei principi di circolarità nel progetto architettonico. Lo schema mostra la reversibilità, il recupero e il riutilizzo di componenti edilizi di alto valore attraverso la progettazione per il riutilizzo e la riconfigurazione.

Fonte: Elaborazione dell'Autore, basata su Durmisevic Elma, 2019, Linee guida BAMB per il Reversible Building Design < <https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/05/Reversible-Building-Design-Strategies.pdf> >

⁸ <https://www.bamb2020.eu/>

⁹ European Commission. New integrated tools help the building sector move to a circular economy. CORDIS – EU research results. < <https://cordis.europa.eu/article/id/396059-dew-integrated-tools-help-the-building-sector-move-to-a-circular-economy> >

Questo programma, come altre esperienze a livello europeo e non solo, sono risultate uno strumento utile per proporre un'alternativa alla logica per cui il progetto è radicato nell'economia lineare del *“estrai, produci, consumi, smaltisci”*. Il loro impatto è stato necessario per un cambiamento di visione del progetto che lo vede rispondere ad un processo diverso, in cui il suo essere non è più la chiusura di un processo, ma l'inizio di una serie di trasformazioni potenziali, fondate sulla **durabilità, la trasformabilità e il disassemblaggio** dell'edificio e dei suoi componenti. Questi aspetti, fondamentali per il passaggio ad un **modello progettuale circolare**, trovano applicazione operativa nelle strategie sistematiche del **modello “10 R” dell'economia circolare**. Il modello si basa sul precedente che presentava **3 R: Reduce, Reuse e Recycle**, e categorizza in maniera più specifica una mappa in grado di orientare, attraverso azioni che rispecchiano i principi circolari, le scelte progettuali per realizzare progetti che incarnano i principi di circolarità e rigenerazione.¹⁰ Le 10 R risultano quindi uno **strumento metodologico operativo** che permette di rendere concreti principi come la durabilità, la trasformabilità e il disassemblaggio.

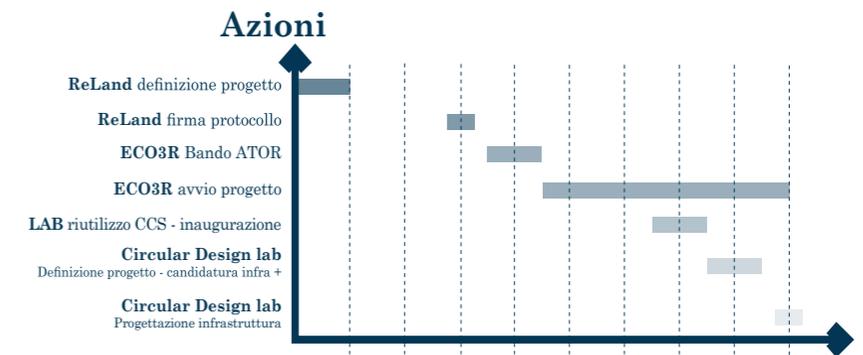
Durante il mio percorso accademico, ho avuto la possibilità di partecipare, con il ruolo di studente collaboratore alla ricerca, al **programma UROP** del Politecnico di Torino nel **progetto di ricerca “Circular Design Polito Lab”** promosso dai docenti del dipartimento DAD Guido Callegari e Riccardo Palma. Il programma di ricerca ha l'obiettivo di realizzare un'architettura sperimentale per le attività di didattica e ricerca situato a Cambiano ed è ancora in corso. I risultati mostrati sono i traguardi raggiunti ad oggi. Durante questa esperienza ho potuto approfondire i principi dell'economia attraverso la loro applicazione pratica in un progetto di architettura. Il **progetto “Circular Design Polito Lab”** nasce nel quadro della **Convenzione ReLand**, sottoscritta nel 2019 dal Comune di Cambiano, il Politecnico di Torino DAD e l'Associazione Off Grid Italia. L'iniziativa si inserisce più in generale nel contesto dell'**Ecosistema Territoriale per la Riduzione, il Riutilizzo e il Riciclo ECO3R**, attivato nel 2020, con la partecipazione di 19 comuni e il Consorzio Chierese Servizi.

10 Cramer, J. (2022, marzo). Building a Circular Future: Ten Takeaways for Global Changemakers (Amsterdam Economic Board/Holland Circular Hotspot). Amsterdam Economic Board. Documento PDF.

Da questa traiettoria di attività è nato il progetto per la realizzazione a Cambiano (TO) di un “Hub sulla Circolarità”, un nucleo di sperimentazione nell'ambito dell'attività di didattica e di ricerca. **Il progetto è stato inserito dal Politecnico di Torino nella rete di infrastrutture di ricerca CIST nell'ambito del Bando Infra+ della Regione Piemonte.** Partner del progetto è Vico Srl, impresa con esperienza pluriennale nel campo delle bonifiche ambientali e del decommissioning adottando come mission e modello di produzione l'economia circolare.

Cronoprogramma progetto *Circular Design Polito Lab*

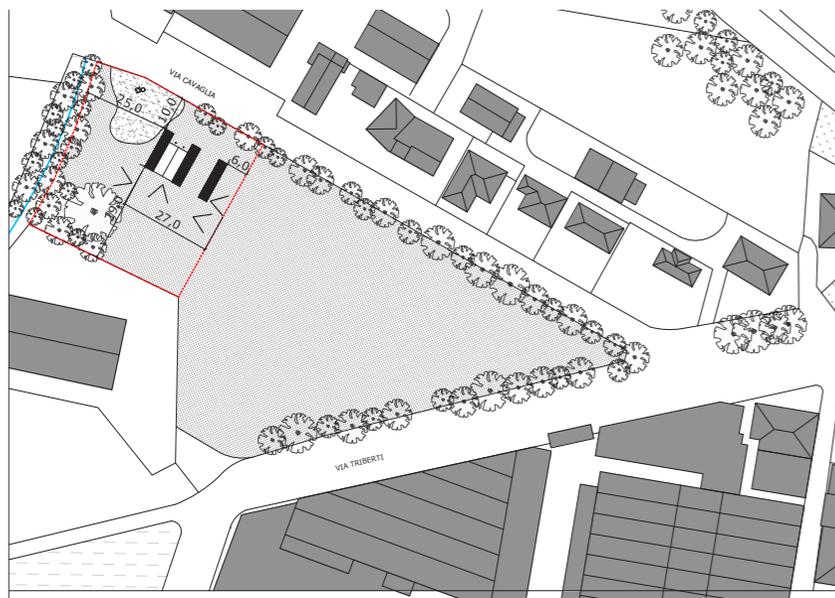
Fonte: Elaborazione a cura del team UROP *Circular Design Polito Lab*



L'obiettivo è quello di inquadrare lo sviluppo di una **architettura sperimentale circolare** per insediare le attività del Laboratorio mediante il **riutilizzo di container navali dismessi e di materiali e componenti derivanti da edifici sottoposti a processo di demolizione**. Ispirato ai principi dell'economia circolare e delle strategie “10R”, il progetto promuove il recupero e la rigenerazione di materiali e componenti. Il progetto si configura così come un laboratorio aperto nel quale apprendimento, sostenibilità e rigenerazione si intrecciano, generando valore attraverso la creazione di un'**infrastruttura didattica** che dà nuova vita a risorse che sarebbero altrimenti rifiuti.

L'area oggetto dell'intervento, con una superficie di 8.023 m² (da variante parziale al PRGC), è situata nel Comune di Cambiano, nella porzione sud-occidentale del territorio comunale, in prossimità della stazione ferroviaria. Tale localizzazione conferisce all'area una posizione strategica, sia per i collegamenti con il sistema di trasporto pubblico, sia per le connessioni dirette al tessuto urbano circostante. La collocazione del lotto consente di preservare l'identità storica di Cambiano, offrendo al contempo spazio a nuovi insediamenti funzionali alla comunità locale.

Il lavoro di ricerca si è aperto quindi, con un'analisi del sito di intervento e successivamente, sono stati selezionati casi studio prevalentemente europei sul riuso dei container marittimi, analizzando strategie progettuali applicate a spazi abitativi, didattici e interventi di rigenerazione urbana. L'indagine ha approfondito elementi chiave come strategie di distribuzione interna, aggregazione modulare, stratigrafie per isolamento e comfort, dettagli costruttivi dell'attacco a terra e uso di materiali di recupero. Tale analisi ha permesso di individuare linee guida progettuali per soluzioni coerenti con un linguaggio architettonico contemporaneo e con il tema del riuso dei container per la realizzazione dei laboratori.



Inquadramento sito di progetto, Cambiano (TO)

Fonte: Elaborazione a cura del team UROP Circular Design Polito Lab: Alessandro Costabello, Veronica Grosso, Maria Antonietta Simone, Elisabetta Tosini

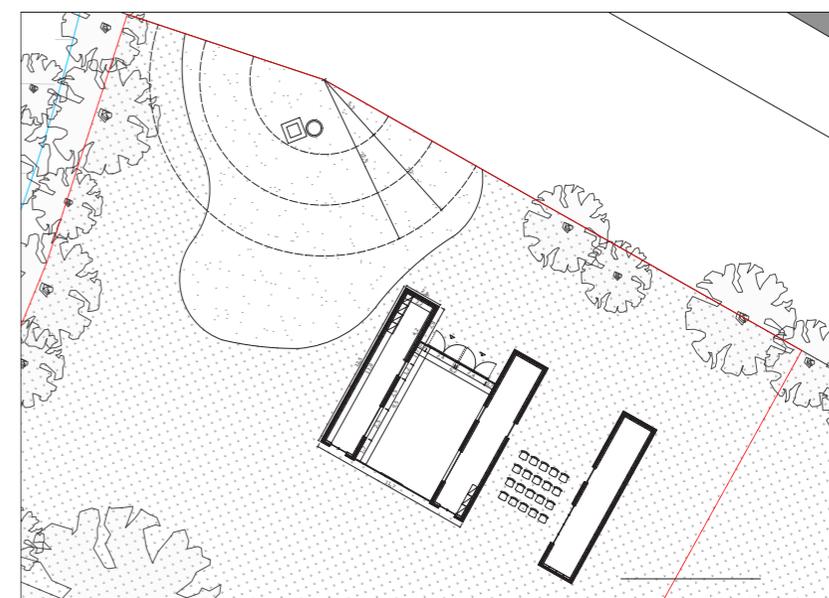
Il riuso dei container marittimi rappresenta il presupposto progettuale dell'intervento, che prevede l'impiego di due moduli provenienti da un lotto dismesso e successivamente smaltito da Vico S.r.l. nell'ambito di un appalto. Ciò sottolinea il contributo operativo di Vico S.r.l. allo sviluppo del progetto, in coerenza con le attività dell'azienda nel settore delle demolizioni e del recupero di materiali.

L'azienda Vico S.r.l. oltre a fornire i container, si è resa disponibile a fornire componenti edilizi recuperati da un processo di decostruzione dalla sede dell'azienda Roto Alba, edificio in disuso per cui è prevista una rifunzionalizzazione.¹¹ Il progettare avendo a disposizione questi materiali recuperati hanno permesso ai partecipanti del progetto di tradurre in pratiche progettuali i concetti di economia circolare. I materiali recuperati tramite il **reclamation audit** hanno fornito la biblioteca di materiali con cui poter progettare questa architettura sperimentale.

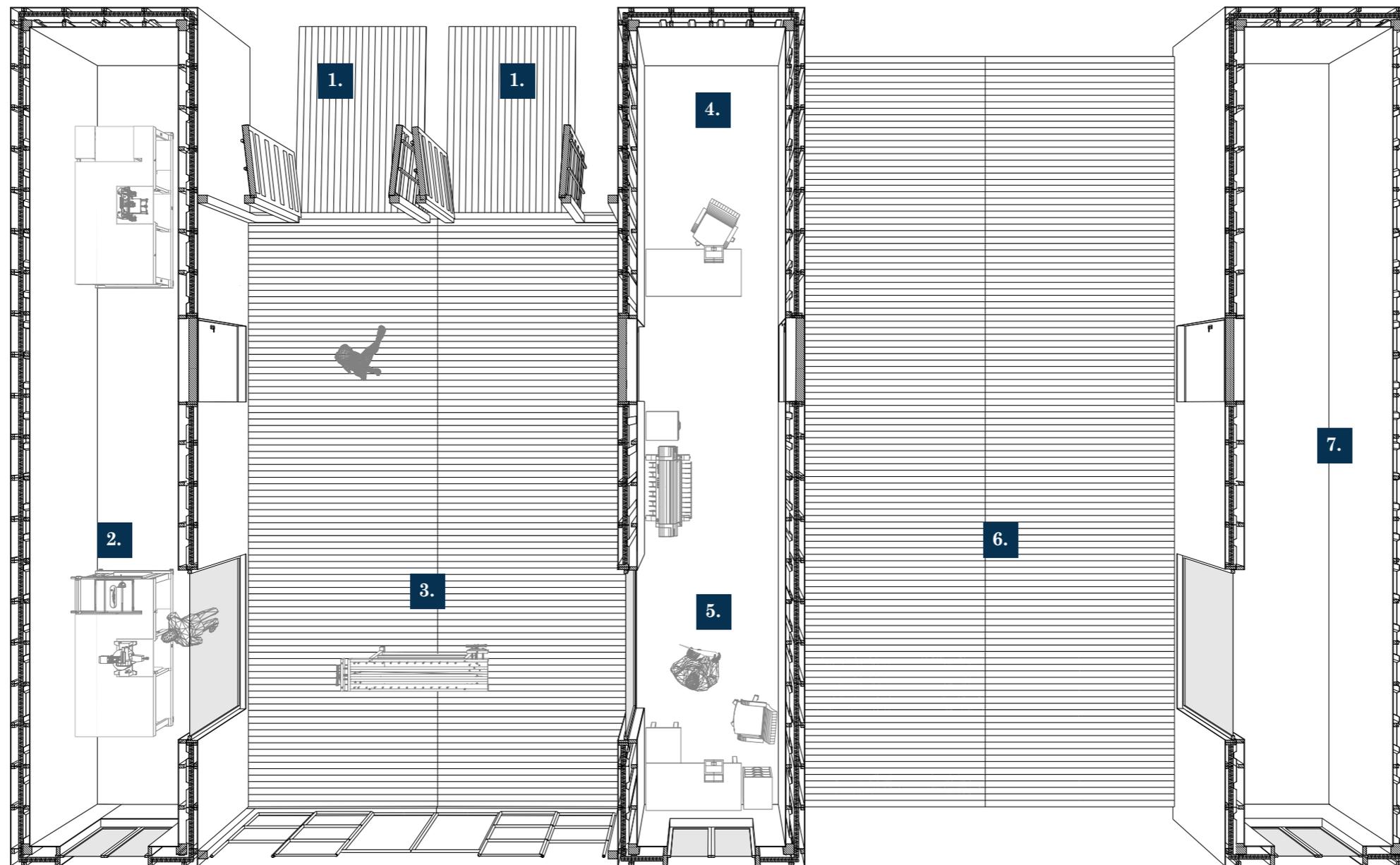
La volontà progettuale era quella di creare uno spazio coperto ottenuto dalla disposizione parallela dei tre container per ottenere uno spazio in cui potesse essere fatta didattica e attività di workshop. All'interno dei due container è prevista la disposizione di un laboratorio e nell'altro container, spazi adibiti ad uffici. I serramenti esterni, le recinzioni, la copertura e gli arredi interni, oltre al rivestimento dei container è stato realizzato con i materiali recuperati dal cantiere di Roto Alba. Sebbene il progetto sia in una fase di progetto iniziale in questo momento, per approcciare il tema di progetto e le metodologie necessarie, è stato fondamentale l'approccio teorico rispetto ai principi dell'economia circolare e questo è stato il punto di partenza in questo elaborato di tesi in quanto è risultato fondamentale per comprendere come l'architettura Off-Site si inserisse nel processo di transizione verso la circolarità.

Posizionamento sul sito di progetto dell'edificio.

Fonte: Elaborazione a cura del team UROP Circular Design Polito Lab: Alessandro Costabello, Veronica Grosso, Maria Antonietta Simone, Elisabetta Tosini



¹¹ Il progetto è stato possibile grazie alla collaborazione dell'azienda con i Dottorandi Alessandro Barra e Tiziano Monteu Cotto. Il loro lavoro di ricerca, in collaborazione con l'azienda Vico S.r.l. ha permesso l'avvio del progetto e la fornitura dei container marittimi utilizzati nel progetto.



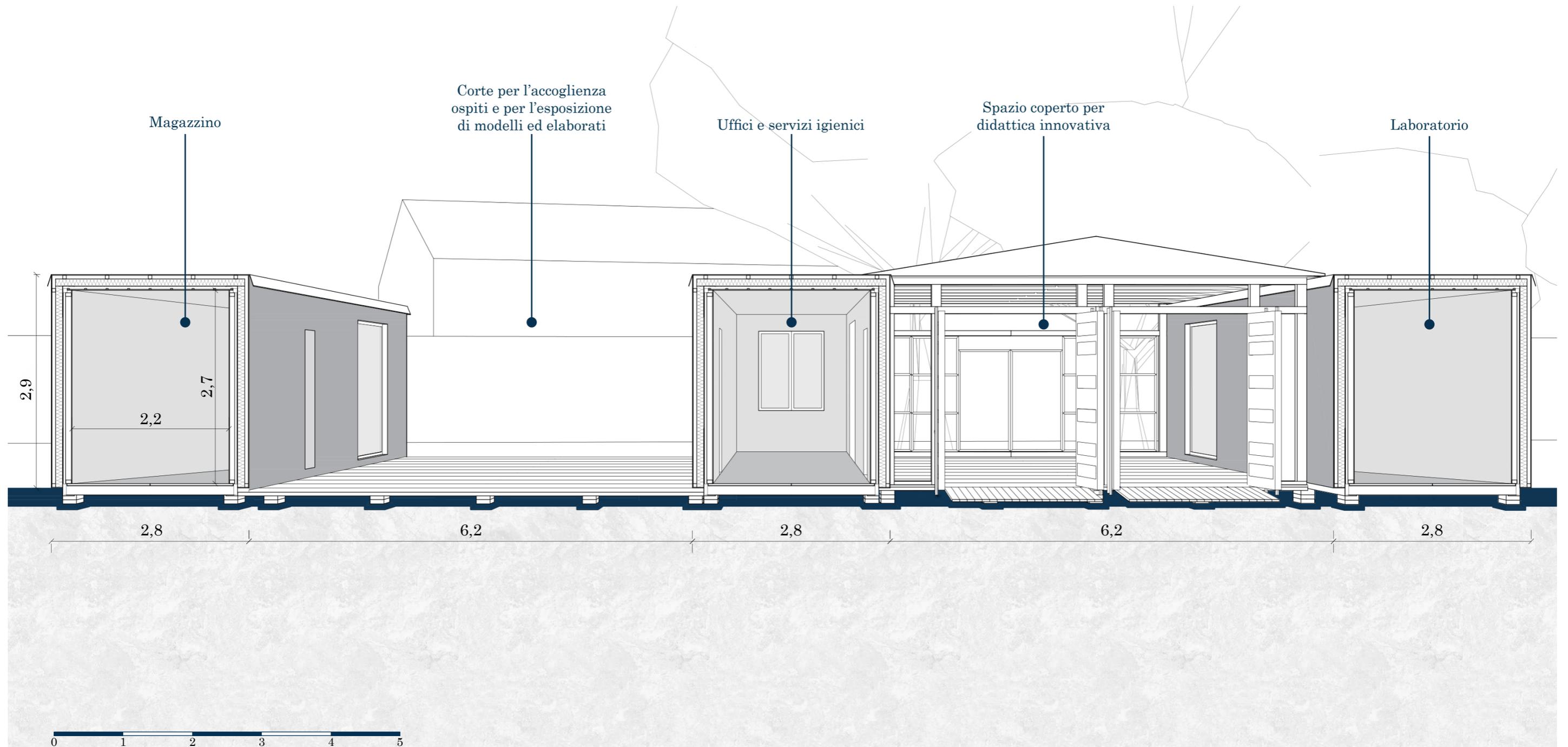
Legenda

- Flussi
- - - Connessione tra differenti spazi funzionali

1. Rampe di accesso principali
2. Laboratorio (26.0 Mq)
3. Spazio coperto per didattica innovativa (60.0 Mq)
4. Servizi igienici (ca 7.0 Mq)
5. Uffici (19.0 Mq)
6. Corte per l'accoglienza ospiti e per l'esposizione di modelli ed elaborati (60.0 Mq)
7. Magazzino (26.0 Mq)

Flussi e disposizione interna. Fuori scala.

Fonte: Elaborazione a cura del team UROP Circular Design Polito Lab: Alessandro Costabello, Veronica Grosso, Maria Antonietta Simone, Elisabetta Tosini



Funzioni previste.

Fonte: Elaborazione a cura del team UROP Circular Design Polito Lab: Alessandro Costabello, Veronica Grosso, Maria Antonietta Simone, Elisabetta Tosini

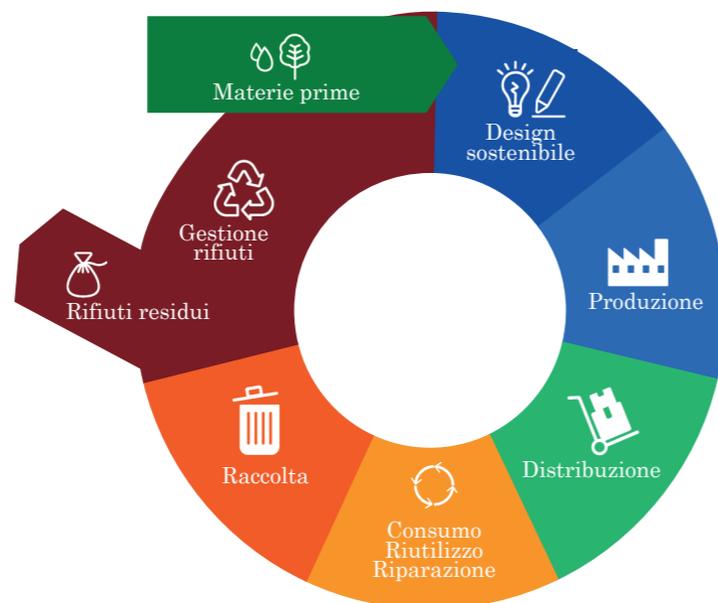
1.2 FONDAMENTI TEORICI E STRUMENTI OPERATIVI DELL'ECONOMIA CIRCOLARE

Kenneth Boulding 1910-1993

Economista e filosofo britannico, tra i primi a trattare il rapporto tra economia, ambiente e limiti ecologici. Nel saggio "The Economics of the Coming Spaceship Earth" del 1966 fornisce la distinzione tra "economia del cowboy", basata sulla concezione di risorse illimitate e crescita infinita, ed "economia dell'astronauta" concepita sulla gestione responsabile delle risorse, assunte come limitate in un sistema chiuso. Questo saggio ha posto le basi teoriche per l'economia ecologica e i concetti di sostenibilità ed economia circolare.

La possibilità di partecipare al progetto e sperimentare gli strumenti operativi della progettazione circolare mi ha portato ad investigare il concetto alla base dei questi strumenti. Il concetto di economia circolare, nella sua formulazione attuale, deve la sua origine a concetti che si sviluppano attraverso una tradizione di pensiero sistemico e progettuale. Le sue basi teoriche possono essere fatte risalire agli studi di **Kenneth Boulding** sul concetto di "economia del mondo chiuso" negli anni Sessanta¹², e il loro sviluppo è legato alle teorie della **blue economy** e dell'approccio tecnico **design for disassembly**, ma è solo negli ultimi vent'anni che esso ha acquisito una forma coerente e applicabile in ambito operativo.

La **Fondazione Ellen MacArthur**, tra i principali attori nella diffusione del paradigma circolare, è stata, attraverso il suo lavoro, fondamentale per definirne una forma coerente e applicabile a livello operativo, anche grazie alla definizione di economia circolare come "**un sistema industriale restaurativo e rigenerativo per intenzione e design**"¹³. Questa definizione evidenzia un punto cruciale: *la circolarità non si ottiene semplicemente attraverso il riciclo a valle, ma deve essere pensata a monte, nel design stesso degli oggetti e degli edifici.*



"Il modello di economia circolare: meno materie prime, meno rifiuti, meno emissioni."

Fonte: Servizio di ricerca del Parlamento Europeo

¹² <https://www.corriere.it/native-adv/eni-longform-04-dall-economia-dell-astronauta-a-quella-circolare-evoluzione-di-un-idea-rivoluzionaria.shtml>

¹³ Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition.*

La portata di questo cambiamento di modello di sviluppo comporta non solo una **risposta tecnica alle crisi ambientali ed economiche**, ma un vero e proprio cambio di **prospettiva culturale e processuale**. Al fine di concretizzare questo cambiamento in pratiche concrete, è necessario dotarsi di **strumenti operativi** in grado di guidare le scelte in ogni fase del ciclo di vita dei prodotti dalla concezione iniziale fino alla sua dismissione o rigenerazione.

Uno degli strumenti più diffusi e sistematici per l'applicazione di questo cambiamento è il modello delle "**10 R**" dell'economia circolare, il quale si configura come una bussola utile e sistemica per orientare i processi verso una maggiore consapevolezza materiale, funzionale ed ambientale¹⁴. Le strategie che compongono questa gerarchia forniscono una lettura multilivello della circolarità, capace di **connettere decisioni progettuali, processi produttivi e impatti sistemici**.

Le 10 R dell'economia circolare rappresentano quindi una **mappa concettuale con applicazioni operative** utile per comprendere e applicare i principi di sostenibilità sistemica nel settore manifatturiero e delle costruzioni. Esse stabiliscono una gerarchia di azioni che permette di **ridurre al minimo l'estrazione di nuove risorse, l'impatto ambientale e la produzione di rifiuti**, promuovendo una **logica rigenerativa**. Oltre alla loro funzione strumentale, queste strategie pongono importanti domande al ruolo del progetto e all'identità dell'architettura come **dispositivo temporale, adattabile e trasformabile**.

L'evoluzione del modello semplificato delle 3 R, **Reduce, Reuse, Recycle**, al sistema delle **10 R** nasce dalla necessità di articolare in maniera più precisa le diverse forme di intervento circolare, riconoscendo il diverso impatto ambientale e culturale che ciascuna di esse comporta. L'articolazione attraverso queste dieci pratiche circolari permette di differenziare il fine delle stesse: alcune puntano sulla **prevenzione** dell'uso di risorse, altre hanno il fine di **prolungare** la vita utile degli oggetti, altre ancora sul **recupero** energetico, ultima opzione quando non sono attuabili le precedenti¹⁵.

¹⁴ Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). *Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation and Recycling, 127*, 221–232.

¹⁵ Stahel, W. R. (2019). *The Circular Economy: A User's Guide*. Routledge.

In ambito architettonico, questa gerarchizzazione di azioni non si traduce direttamente in azioni tecniche ma apre una riflessione critica sul modello stesso in cui concepiamo **la durata, la reversibilità e la continuità dell'opera costruita**. Queste 10 R invitano ad un **cambiamento di paradigma** del progetto portando con sé la considerazione che non tutto ciò che è tecnicamente possibile costruire è necessario o sostenibile, e ogni nuova costruzione deve essere pensata come parte di un **ciclo complesso di relazioni ambientali sociali e materiali**.¹⁶

Le 10 R, declinate come dispositivo progettuale possono essere declinate come interventi tecnici e approcci per mettere in pratica una transizione da un sistema lineare ad uno circolare:

- 1. Refuse (rifiutare):** In architettura, si traduce nel **non costruire come scelta progettuale**, optando per il riuso dell'esistente o il non intervento. È un atto radicale, che impone di interrogarsi sulla necessità dell'azione edilizia.
- 2. Rethink (ripensare):** Chiede di **ridefinire la funzione e il ciclo di vita dell'edificio**, attraverso approcci basati su flessibilità, temporaneità e adattabilità. Il progetto non è più oggetto finito, ma **infrastruttura trasformabile nel tempo**.
- 3. Reduce (ridurre):** Comporta l'ottimizzazione dei materiali e dei processi. I sistemi prefabbricati in legno riducono gli scarti e l'impatto di cantiere, offrendo **efficienza costruttiva e ambientale**.
- 4. Re-use (riutilizzare):** In architettura, si manifesta attraverso il **riutilizzo di edifici, strutture, materiali e componenti**. Rappresenta un'opportunità per ripensare il patrimonio come risorsa, valorizzando anche l'identità culturale dell'esistente.
- 5. Repair (riparare):** Implica l'estensione della vita utile di edifici e componenti, favorendo una logica di **cura e manutenzione** invece che di sostituzione. Questo valorizza il **tempo come risorsa** e richiede materiali e dettagli progettati per l'accessibilità.

- 6. Refurbish (rinnovare):** Richiede la sostituzione di componenti o parti dell'edificio **mantenendo la struttura originale**. La sostituzione delle parti avviene per allungare la vita dell'organismo edilizio con il fine di rinnovare componenti usurati o che non soddisfano più le prestazioni.
- 7. Remanufacture (ricostruire):** Invita a ripensare elementi edilizi da rifabbricare o adattare, in logica **modulare e smontabile**. È coerente con i sistemi Off-Site, in cui la produzione controllata permette aggiornamenti e reimpieghi in serie.
- 8. Repurpose (riadattare):** Coinvolge la **rifunzionalizzazione di oggetti o edifici**. La trasformazione adattiva dell'esistente permette di rispondere a nuove esigenze senza nuovi impatti costruttivi. L'architettura diventa così un campo **aperto e ricombinabile**.
- 9. Recycle (riciclare):** Resta una strategia essenziale, ma energeticamente dispendiosa e meno desiderabile rispetto a quelle precedenti. Richiede una progettazione orientata alla **separazione dei materiali e alla purezza dei cicli tecnici e biologici**¹⁷.
- 10. Recover (recuperare energia):** È l'estrema ratio, legata alla termovalorizzazione. Non rappresenta una strategia architettonica in senso stretto, ma **un segnale della fine del ciclo di un materiale**.

¹⁶ Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy*.

¹⁷ Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). "Circular Economy for the Built Environment: A Research Framework." *Journal of Cleaner Production*, 143.

La gerarchia delle 10 R definisce un approccio circolare al progetto architettonico, incentivando un **cambio di sensibilità progettuale** basato sulla logica della trasformabilità, della responsabilità e del tempo. Questa sensibilità implica una mutazione nella concezione dei processi produttivi ma è interessante capire come questa comporti un cambiamento anche nel concetto di architettura. Si abbandona l'ideale di esistenza assoluta in cui l'architettura assume una forma monumentale e permanente in favore di una concezione di **architettura rigenerativa, edifici mutabili, ciclici e riconfigurabili**.

Questo implica una responsabilità progettuale che, nel caso dell'architettura, si traduce nella necessità di concepire edifici che possano essere facilmente mantenuti, adattati, disassemblati e riutilizzati, con componenti identificabili, separabili e compatibili. L'economia circolare, quindi, **non si riduce a una tecnica**, ma si configura come **una cultura progettuale e industriale** che modifica profondamente il ruolo dell'architetto e la relazione tra progetto, materia e tempo. In questo senso diventa centrale l'approccio per cui ogni materiale impiegato in un edificio deve poter essere recuperato e reinserito in un nuovo ciclo, con una logica che va oltre l'uso singolo e punta alla continuità del valore nel tempo.

Per poter recuperare e reinserire i componenti edilizi in nuovi cicli sono di supporto i sistemi costruttivi a secco in quanto il recupero, la manutenzione e l'aggiornamento di questi risulta più agevole. In questa prospettiva, le architetture Off-Site, il cui **design per la produzione e per il disassemblaggio** permette di realizzare edifici realizzati con sistemi costruttivi a secco, risulta **strettamente compatibile** con un approccio per cui i materiali devono essere gestiti nel tempo. A ciò, va considerato che l'utilizzo di software BIM e la progettazione parametrica, largamente correlati alle strategie Off-Site, consentono di **tracciare i materiali e i componenti utilizzati** nei progetti e gestire le informazioni per facilitare le azioni presentate nelle 10 R, aprendo la strada ad una **nuova grammatica progettuale della circolarità**.¹⁸

18 Akinade, O. O., et al. (2017). "Design for Deconstruction Using BIM Tool." *Buildings*, 7(4), 95.

Le conseguenze dell'economia circolare nel settore delle costruzioni sono connesse direttamente con **la digitalizzazione dei processi progettuali**. Il ricorso a strumenti come il **Building Information Modeling (BIM)** consente di tracciare i materiali, simulare scenari di manutenzione e disassemblaggio, ottimizzare il flusso delle risorse e favorire l'adozione di strategie circolari lungo tutto il ciclo di vita dell'edificio, come dimostrato nell'articolo di Nkechi Mcneil-Ayuk e Ahmad Jrade¹⁹. In questo senso, il progetto architettonico diventa anche una **struttura informativa**, capace di abilitare il riuso, il riciclo e la gestione sostenibile nel tempo.

La prospettiva di digitalizzazione dei processi produttivi legata all'applicazione dei principi di circolarità in architettura si integra con i concetti alla base dei **Modern Methods of Construction**, alternativa ai modelli costruttivi tradizionali, che promuove **una transizione ecologica e industriale** attraverso l'introduzione di **tecniche costruttive innovative, digitalmente integrate e orientate all'efficienza, alla qualità e alla sostenibilità**, come le strategie Off-site, l'utilizzo di componenti modulari, la progettazione integrata e processi ispirati all'industria manifatturiera. Gli obiettivi di questi approcci sono di favorire un passaggio da un'architettura tradizionale, in cui il progetto ha una **"logica usa e getta"**, a un modello di produzione industrializzata, integrabile e standardizzabile, capace di garantire maggiore efficienza, prevedibilità e qualità. Con questa prospettiva, l'integrazione tra progettazione digitale, supportata da sistemi BIM e dalla metodologia DfD e DfMA, e la produzione industrializzata, costituisce un presupposto fondamentale del paradigma MMC in funzione dei principi di circolarità.

19 McNeil-Ayuk, N., & Jrade, A. (2024, settembre). Integrating Building Information Modeling (BIM), GIS, and Circular Economy (CE) for the Construction and Deconstruction Waste Based on Construction Methods at the Conceptual Design Stage of Buildings. In Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference 2023, Volume 4 (pp. 343–356).

Tra le diverse strategie legate ai MMC, **l'architettura Off-Site** si configura come una delle più promettenti. Essa permette di spostare gran parte del processo costruttivo **del cantiere allo stabilimento**, con notevoli vantaggi in termini di tempistiche, sicurezza, di controllo della qualità, gestione dei rifiuti e riduzione delle emissioni. Le strategie Off-Site rappresentano una **alternativa ai modelli costruttivi tradizionali** ma anche un cambiamento della concezione della costruzione di edifici che risponde alle necessità globali, locali e del settore delle costruzioni, favorendo il raggiungimento degli obiettivi ambientali, sociali ed economici. Le strategie di prefabbricazione Off-Site non devono essere viste come processi standardizzati, modulari e industrializzati, caratterizzati da una bassa flessibilità nelle soluzioni e nelle variabili, strategie attuabili solamente in **progetti ex-novo**, bensì come strategie che si sono dimostrate **efficienti e capaci** di fornire **alternative concrete** per quanto riguarda progetti di intervento sul patrimonio edilizio esistente attraverso **retrofit** e la realizzazione di moduli abitativi temporanei per il trasferimento degli utenti. **L'architettura Off-Site** non si limita quindi alla costruzione ex-novo ma configura come una strategia **ibrida, flessibile e capace di adattarsi** a molteplici condizioni di contesto, abitative e normative.

1.3 L'IMPATTO DEL MODELLO DI SVILUPPO LINEARE E DEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI

I **Modern Methods of Construction, MMC**, sono una risposta alla necessità di **cambiamento** dovuta all'inefficienza dei sistemi costruttivi tradizionali, assimilabili ai **modelli lineare**, dei quali l'economia circolare **offre un'alternativa**. Il modello lineare rappresenta il modello di sviluppo economico che si è diffuso in tutto il mondo a partire dalla rivoluzione industriale ed è definito dalla logica estrattiva *"Take-make-dirpose"*, logica secondo cui lo sviluppo è dovuto dal prelevare risorse naturali da immettere in un sistema produttivo che permette di trasformarle in prodotti, che poi, dopo essere stati usati, vengono smaltiti come rifiuti. Questa logica economica e di sviluppo è stata la ragione della crescita economica e dello sviluppo urbano ma ora, questo modello di sviluppo non è più sostenibile dal punto di vista ambientale, sociale ed economico.²⁰

Il fattore che ha avuto il ruolo di indicatore della insostenibilità dello sviluppo lineare è **l'emergenza climatica** e le sue ripercussioni sistematiche nei temi ambientali, sociali ed economici. Il legame tra questi temi e il cambiamento climatico è stato esposto nei rapporti dell'**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** e le **Nazioni Unite**, organizzazioni che hanno individuato come causa principale di questo fenomeno le emissioni di gas effetto serra, GHG.²¹ **L'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Ambiente, ONU**, identifica come il responsabile principale la **produzione di energia elettrica e termica**, e le città consumano il 78% dell'energia mondiale, producendo oltre il 60% delle emissioni di gas serra.²² Questo dato pone al centro del problema le attività umane e i luoghi in cui vengono fatte, l'ambiente costruito.

Dal 1990 le fonti di emissioni sono cresciute rapidamente come **conseguenza della crescita dei processi industriali**, pari al 25%, e **della crescita del settore manifatturiero e delle costruzioni** pari al 60%, il che evidenzia come il modello di sviluppo che ha portato a questa crescita, quello lineare, non sia più un modello sostenibile e che serva un modello circolare che ci permetta di avviare un processo di cambiamento al fine di rendere più sostenibile lo sviluppo.

²⁰ European Commission (2015). *Closing the Loop: An EU Action Plan for the Circular Economy*. < https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en >

²¹ <https://www.wri.org/insights/5-major-takeaways-ipcc-report-global-climate-change>

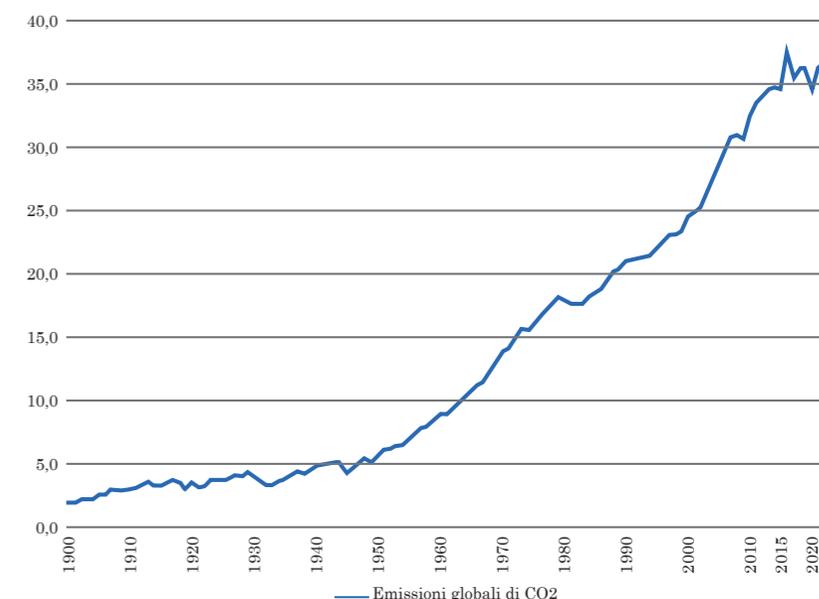
²² <https://www.un.org/en/climatechange/climate-solutions/cities-pollution>

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC

Istituito nel 1988 dalle Nazioni Unite, è un organo scientifico incaricato di valutare le conoscenze disponibili sui cambiamenti climatici. Il suo ruolo è pubblicare periodicamente i Rapporti di Valutazione redatti da esperti internazionali. Questi sono la base scientifica per comprendere le cause, gli impatti e le possibili strategie di mitigazione e adattamento alla crisi climatica.

Emissioni di CO₂ dovute alla combustione di energia e ai processi industriali dal 1900-2023.

Fonti: Elaborazione dell'autore dei dati IEA (2025), *Emissioni globali di CO₂ dalla combustione di energia e dai processi industriali e loro variazione annuale, 1900-2023*, IEA, Parigi



Il settore delle costruzioni assume un ruolo da protagonista per quanto riguarda l'emergenza climatica, contribuendo in modo diretto ed indiretto a una quota significativa delle emissioni globali di gas serra, GHG. Il **World Resources Institute – Clime watch** nel suo rapporto "Dati e metodologia sulle emissioni di gas serra per paese di Climate Watch"²³, **l'energia è la principale fonte di emissioni globali** e una parte rilevante di questo consumo è legata agli edifici, alla loro realizzazione ed utilizzo.

Il **settore energetico** viene individuato quindi come il principale responsabile di emissioni GHG, ma per analizzarne comprenderne l'origine, nel report, viene analizzata per quale fine viene prodotta l'energia, per quale destinazione d'uso finale. All'interno di questa divisione troviamo che il **29,7%** della produzione energetica avviene per la **produzione di energia elettrica e termica**, il 13,7% per la produzione di energia legata ai trasporti, il **12%** per l'energia prodotta nell'**industria manifatturiera ed edilizia** e in fine il **6,6%** per il **settore delle costruzioni**.²⁴ Si può quindi dedurre che, se si combina l'energia prodotta per la **produzione dei materiali** destinati all'**edilizia**, per la **costruzione degli edifici**, per l'**utilizzo** e per la **dismissione**, il peso del settore delle costruzioni nel bilancio delle quote delle emissioni GHG è pari al **24,1% delle emissioni globali di CO₂**.

Per quantificare a quanto equivale questa percentuale possiamo rifarci ai dati raccolti relativi al 2021, anno nel quale veniva monitorata la ripresa delle attività ritornate ai livelli pre-pandemia, hanno evidenziato un aumento del 4% della domanda energetica e di conseguenza si è avuto un picco di emissioni di cui una grande fetta, 10 GtCO₂, derivanti dal funzionamento degli edifici. Ad esse vanno aggiunte 3,6 GtCO₂ stimate, per la produzione di materiali da costruzione come cemento, acciaio, alluminio, vetro e mattoni per un totale di 13,6 GtCO₂. I dati raccolti testimoniano come gli **edifici abbiano rappresentato quindi il 37% delle emissioni globali di CO₂** nel 2021.²⁵

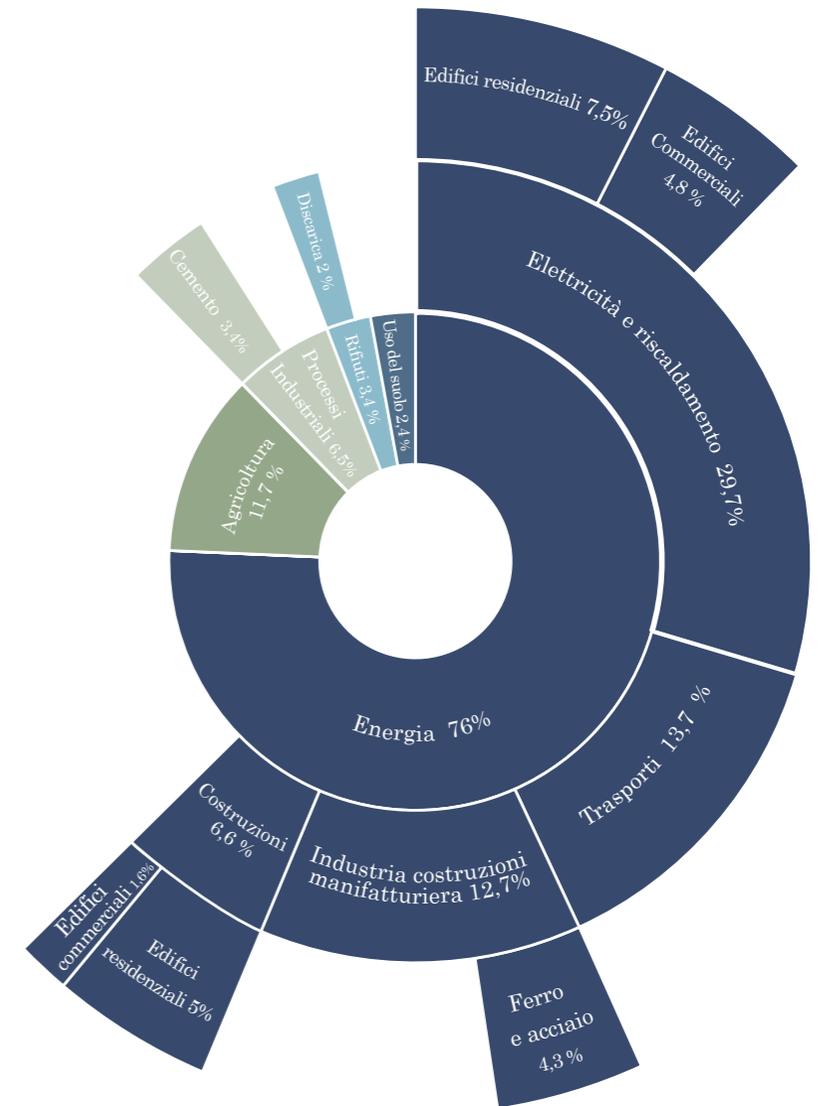
23 Ge, M., & Friedrich, J. (2024). Climate Watch Country Greenhouse Gas Emissions Data and Methodology. World Resources Institute.

24 <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>

25 GlobalABC. (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. United Nations Environment Programme. Pag. 16

World Resources Institute

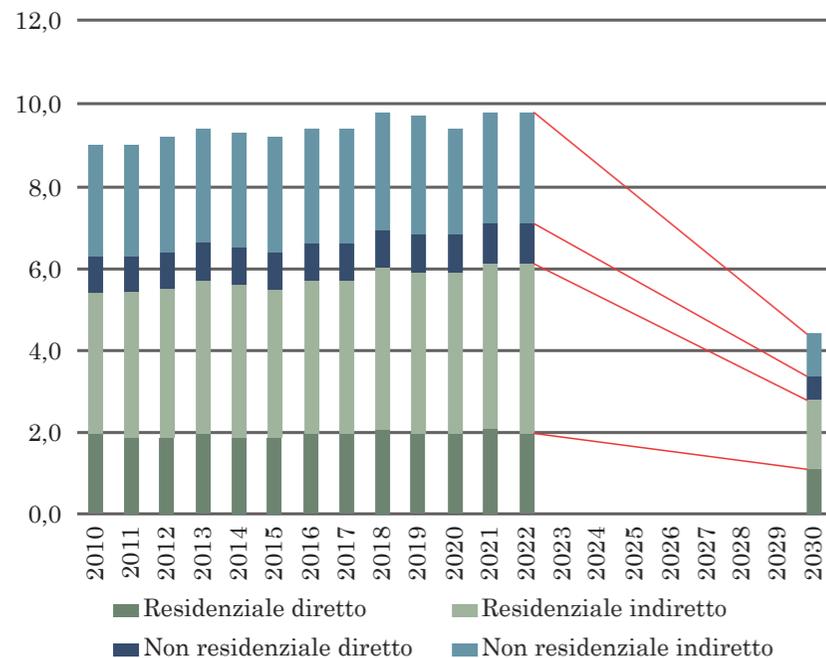
Fondato nel 1982 è un'organizzazione internazionale di ricerca e analisi ambientale. Fornisce dati, strumenti e studi scientifici per supportare politiche e strategie di sviluppo sostenibile. Il campo di interesse sono i cambiamenti climatici, la gestione delle risorse naturali e la transizione verso un'economia a basse emissioni. I report del Climate Watch sono utilizzati per valutare l'emergenza climatica e orientare gli interventi di mitigazione ed adattamento.



Rappresentazione grafica delle quote di emissione di gas serra suddivise per finalità d'uso.

Fonte: Rielaborazione dell'autore dei dati forniti dal rapporto "Dati e metodologia sulle emissioni di gas serra per paese di Climate Watch, World Resources Institute – Clime watch"

A livello europeo, Ursula Von der Leyen, Presidente della Commissione europea, durante il discorso sullo Stato dell'unione nel Settembre 2020 denunciava come gli edifici europei siano **responsabili del 40% del consumo energetico** e del **36% delle emissioni di gas a effetto serra**, impatto dovuto principalmente dalla costruzione, utilizzo, ristrutturazione e dalla demolizione degli edifici. Nel rapporto relativo all'**obiettivo di neutralità** in termini di emissioni di carbonio entro il **2050**, viene inoltre affermato come oggi, circa il **75% del parco immobiliare** dell'UE è **inefficiente sotto il profilo energetico**. Ciò significa che gran parte dell'energia utilizzata va sprecata. Questo spreco di energia può essere ridotto al minimo **migliorando gli edifici esistenti** e cercando soluzioni intelligenti e materiali efficienti sotto il profilo energetico quando si costruiscono nuove abitazioni.²⁶ Questo risulta fondamentale in ottica **Net Zero** entro il 2030, in quanto per raggiungere tale obiettivo viene chiesto al settore di **diminuire del 45% le emissioni dirette** degli edifici residenziali e del **58,5% quelle indirette** mentre per quanto riguarda le emissioni dirette degli edifici non residenziali la diminuzione dovrà essere del 40% per le emissioni dirette e del 63% per quelle indirette.²⁷



Emissioni globali di CO₂ derivati dal funzionamento degli edifici nello scenario Net Zero 2010-2030

Fonte: Rielaborazione dell'autore dei dati forniti da IEA: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-the-operation-of-buildings-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>

²⁶ https://commission.europa.eu/news-and-media/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_it

²⁷ <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20180305STO99003/ridurre-le-emissioni-di-anidride-carbonica-obiettivi-e-azioni-dell-ue>

United Nation Environment Programme UNEP

Istituito nel 1972 dopo la Conferenza di Stoccolma, è l'agenzia delle Nazioni Unite che si occupa delle questioni ambientali. Il suo obiettivo è quello di promuovere politiche e azioni globali per la sostenibilità e sostenere i Paesi nelle sfide contro il cambiamento climatico. Svolge un ruolo centrale nell'analisi dell'emergenza climatica attraverso rapporti periodici come il *Global Status Report* e l'*Emissions Gap Report*.

Per poter avviare questo processo, deve **cambiare l'approccio progettuale** in modo da invertire la tendenza per cui oggi, la maggior parte degli edifici è stata progettata **senza considerare i principi di reversibilità, disassemblaggio, o il riuso dei materiali** e questo comporta che le demolizioni producono grandi quantità di rifiuti eterogenei e difficili da riciclare come evidenziato dal **"Global Status Report: towards a zero emission, efficient and resilient building and construction sector"** redatto dall'UNEP nel 2016 nel quale si quantificano i rifiuti solidi a livello mondiale prodotti dal settore delle costruzioni come un terzo a livello mondiale.

Un altro aspetto critico legato all'utilizzo dei materiali nel settore delle costruzioni è la **difficoltà di tracciabilità e gestione dei materiali** lungo il ciclo di vita dell'edificio. Il progetto tradizionale non tiene conto di **strumenti di monitoraggio** lungo il ciclo di vita dell'edificio per facilitare la manutenzione, la sostituzione di parti o il riuso di componenti. Le **informazioni** legate ai **materiali**, ai **fornitori**, alla **durabilità** o alla **compatibilità** degli stessi non vengono trasmesse e quindi risulta difficile mettere in pratica forme di **gestione circolare dell'edificio**.²⁸

Per quanto riguarda il piano sociale, il modello lineare, nel settore delle costruzioni ha contribuito alla **fragilità degli insediamenti urbani** nei quali costruzioni seriali, materiali di bassa qualità, modelli abitativi standardizzati e privi di relazione con il contesto ha comportato crisi abitative che trovano nelle periferie degradate una cassa di risonanza.²⁹

Per quanto riguarda il fronte economico, il modello lineare si sta rivelando inefficiente e vulnerabile. La crescente **scarsità di materie prime**, l'**aumento dei costi energetici** e le **pressioni normative** legate al cambiamento climatico rendono sempre più rischioso e oneroso un sistema fondato sulla linearità. Le aziende del settore delle costruzioni che continuano ad operare in logiche lineari rischiano di perdere competitività in un contesto internazionale sempre più orientato verso la **decarbonizzazione e l'efficienza delle risorse**.³⁰

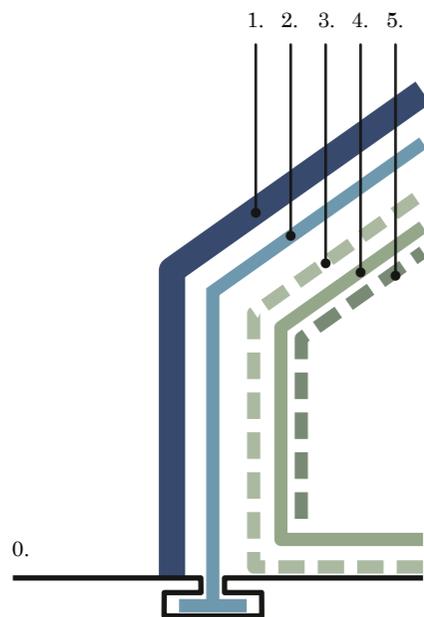
²⁸ Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). "Circular Economy for the Built Environment: A Research Framework." *Journal of Cleaner Production*, 143, 710–718.

²⁹ Ibidem

³⁰ Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*.

1.4 MODERN METHODS OF CONSTRUCTION E ARCHITETTURA OFF-SITE: POSSIBILITÀ DI SVILUPPO CIRCOLARE

Ci troviamo quindi all'interno di un **processo di cambiamento in atto** che, in conseguenza ai limiti dimostrati dal modello di sviluppo lineare, vede il **modello circolare** e gli approcci affini come **risposta metodologica** per il settore delle costruzioni. L'economia circolare non si limita ad un diverso utilizzo delle risorse ma introduce un **cambio di paradigma radicale**, non solo nell'**utilizzo dei materiali** ma anche nella gestione dell'ambiente costruito a livello urbano e un utilizzo migliore delle risorse economiche ed energetiche. Questo comporta un cambiamento sistemico che ha ripercussioni nell'**approccio progettuale e costruttivo** dell'ambiente costruito che investe la concezione dell'edificio, le **modalità di progettazione e i processi costruttivi**.



Layer edificio e ciclo di vita:

- 0. Sito di costruzione
- 1. Rivestimento esterno (20-60 anni)
- 2. Struttura (20-200 anni)
- 3. Impianti (5-30 anni)
- 4. Divisioni interne (5-30 anni)
- 5. Finiture e arredi (0-15 anni)

Fonte: Rielaborazione dell'autore dello schema di Steward Brand

La **progettazione architettonica**, in rispetto dei principi di circolarità, comporta una profonda ridefinizione del progetto, che da **dispositivo formale** per la **rappresentazione tecnica e spaziale** assume anche il ruolo di strumento di configurazione sistemica. La progettazione circolare comporta la previsione di eventuali **trasformazioni future dell'edificio**, di scenari d'uso multipli, la **facilitazione nel disassemblaggio** e la **valorizzazione dei materiali** a fine vita. L'edificio, nel modello circolare, può essere concepito come un **sistema aperto**, composto da sottosistemi e **componenti intercambiabili**. Questa visione è stata introdotta da **Steward Brand** nel 1994 nel libro *How Buildings Learn*. Questa concezione ha lo scopo di **suddividere in layer l'edificio**, definendo in modo più chiaro il **ciclo di vita di ognuno**. I componenti vengono divisi in **sei livelli**, il sito di costruzione, la struttura, il rivestimento esterno, gli impianti, le divisioni interne e le finiture e gli arredi.³¹ Concepire l'edificio come un insieme di differenti livelli, con cicli di vita di differenti durate, permette di **applicare i principi dell'economia circolare** in modo più semplice. Individuando differenti esigenze di manutenzione e di vita utile dei livelli, permette una progettazione che contempla la necessità di intervenire su una determinata categoria di componenti e facilita la progettazione circolare. Nel libro di **Ryan E. Smith** *Prefab Architecture*, questa suddivisione in livelli, viene applicata come divisione per la definizione dei sistemi di industrializzazione Off-Site.³²

³¹ Brand, S. (1994). *How buildings learn: What happens after they're built*. New York: Viking Press.

³² Smith, R. E. (2010). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. Wiley

Questa concezione è stata ripresa poi da **Roger-Bruno Richard** con la classificazione dei sistemi costruttivi industrializzati, assumendo il sito di costruzione come fattore che rende unica l'architettura in quanto non può essere prodotto. L'autore distingue i **sistemi in aperti o chiusi** in base alla possibilità di sostituire elementi, sottosistemi o interfacce, senza compromettere l'intero sistema.³³ I sistemi Off-Site in legno, in particolare quelli a telaio o a pannelli modulari, permettono una combinazione tra prefabbricazione e adattabilità, grazie a connessioni a secco, elementi standardizzati e dettagli reversibili³⁴.

Il **Design for Disassembly, DfD**, è uno dei concetti alla base della progettazione circolare in quanto è una metodologia che applica un insieme di strategie progettuali che consentono lo smontaggio selettivo degli elementi costruttivi, il recupero dei materiali e il riutilizzo dei componenti.³⁵ A supporto di questa trasformazione emergono i **Modern Methods of Construction** e in particolare le **strategie Off-Site**, che offrono strumenti concreti per tradurre i principi della circolarità in pratiche operative. In questa prospettiva, l'edificio viene concepito come una riserva di materiali e componenti che prevede la possibilità di disassemblaggio, per essere aggiornato e rigenerato. Per rendere possibile questa concezione, sono necessarie informazioni riguardanti le componenti edilizie, i materiali usati e gli impianti integrati nell'edificio e questo è possibile attraverso strumenti come il **Building Information Modeling, BIM**, e i **material passport**, che consentono di tracciare i materiali utilizzati facendo operazioni di manutenzione, riuso e recupero.³⁶ Questi strumenti sono utili a questi fini ma per contemplarli e facilitarne l'esecuzione è fondamentale un approccio in cui si sono seguite le **metodologie DfD, Design for Disassembly, e DfMA, Design for Manufacturing and Assembly**. Il DfMA rappresenta un approccio progettuale che integra progettazione, produzione e assemblaggio sin dalle fasi iniziali, al fine di ottimizzare costi, tempi e risorse, riducendo complessità, sprechi in cantiere e il disassemblaggio.

³³ Richard, R. B. "Categorization of Industrialized Building Systems." In: Smith, R. E., & Quale, J. D. (2017). *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge.

³⁴ Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies are Poised to Transform Building Construction*. McGraw-Hill.

³⁵ Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015). Design for Disassembly and Deconstruction – Challenges and Opportunities. *Procedia Engineering*, 118, 1296–1304. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815021402>>

³⁶ Akinade, O. O., et al. (2017). "Design for Deconstruction Using BIM Tool." *Buildings*, 7(4), 95.

Fondamentale è l'aspetto che consente di concepire edifici che si prestino a **processi di disassemblaggio** al fine di riutilizzare, sostituire componenti o a fine vita dell'edificio, e questo è possibile grazie all'adozione di componenti prefabbricati e strategie Off-Site.³⁷ La differenza tra le due è che la prima, DfD si concentra sulla facilità di disassemblaggio del prodotto al fine di riparare, aggiornare o riciclare i materiali che compongono l'edificio mentre la seconda, DfMA, mira a rendere più efficiente la produzione e l'assemblaggio, riducendo costi e tempi. Per l'applicazione di queste metodologie è necessaria una filiera che permetta la valorizzazione dei materiali da costruzione attraverso un approccio circolare. Un esempio virtuoso di un attore è l'azienda belga **Rotor Deconstruction** pioniera nel campo dei componenti edilizi recuperati, smonta, condiziona e vende i materiali. I suoi interventi sono indirizzati verso edifici progettati con un sistema lineare, ma il loro lavoro fornisce un tassello fondamentale per il riutilizzo dei componenti edilizi in progetti che applicano le metodologie DfD e DfMA. L'applicazione di queste metodologie ha visto un passo importante con lo sviluppo del programma di ricerca *"The Circular Economy in the Built Environment"* che ha portato alla realizzazione di un prototipo di architettura che prevedeva il suo completo disassemblaggio. Il progetto, **Circular Building**, sviluppato dallo studio **Arup** nel 2016, ha adottato elementi standardizzati e connessioni reversibili per garantire il riutilizzo di tutti i componenti. Per attuare questa metodologia sono stati utilizzati modelli BIM per tracciare e registrare materiali e componenti durante il loro ciclo di vita.³⁸ Grazie a progetti come questo, che hanno avuto risonanza, è stata aperta la strada e sono nati progetti come il **Wooden Nursery** dello studio **Djuric Tardio Architectes** nel 2020. Sviluppato per l'esigenza di trovare una **soluzione temporanea** per gli alunni delle scuole d'infanzia di Parigi che dovevano essere rinnovate, il progetto applica i principi DfD e DfMA per **ridurre i tempi** di cantiere, i disagi a livello urbano e il trasferimento sul territorio della città per evitare che i bambini delle scuole interessate dovessero affrontare lunghi viaggi per andare a scuola. Grazie ad una **struttura lignea e una base in acciaio**, entrambe **prefabbricate e modulari**, può essere **facilmente disassemblato** e spostato senza la necessità di sistemi di fondazione impattanti sull'ambiente.³⁹



Magazzino dei componenti edilizi recuperati.
Fonte: Sito web Rotor Deconstruction



Assemblaggio dei componenti del Wooden Nursery.

Fonte: Sito web Archello



Stabilimento produttivo WolfHaus Italia.
Fonte: Sito Web azienda.

La transizione da un modello lineare ad uno circolare, oltre ad essere una questione tecnica, ha **ripercussioni a livello culturale e progettuale**. Le figure professionali che intendono sviluppare un progetto architettonico con una visione circolare sono tenute ad assumere un ruolo strategico nella **riconfigurazione dell'approccio architettonico**. In particolare, l'architetto, non assume più solamente un ruolo di autore di forme statiche, ma si trova ad avere a dover **mediare** con entità legate al **tempo**, alla **materia** e alla **funzione** per poter comprendere e progettare **architetture reversibili, adattabili e connessi a cicli di vita più lunghi e circolari**.

Il modello di sviluppo circolare pone i **Modern Methods of Construction** e le sue strategie come un mezzo per attuare i processi necessari al concretizzare il cambiamento. In questo scenario, le **strategie Off-Site** si configurano come un sistema integrato di progettazione, prefabbricazione e assemblaggio, per l'applicazione dei principi dell'economia circolare nel settore delle costruzioni. I paradigmi dell'Off-Site e della circolarità condividono una **visione sistemica fondata sull'efficienza**, la **riduzione degli sprechi** e la capacità di **pianificare, anticipare e gestire il ciclo di vita** dei prodotti edilizi. Per attuare questa visione, le strategie Off-Site, in rottura con i modelli costruttivi tradizionali, hanno come concetto alla loro base il **trasferimento del lavoro dal cantiere**, ambiente incerto e variabile, **allo stabilimento**, ambiente controllato in cui materiali e componenti vengono gestiti secondo processi industrializzati.⁴⁰

³⁷ Smith, R. E. (2010). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

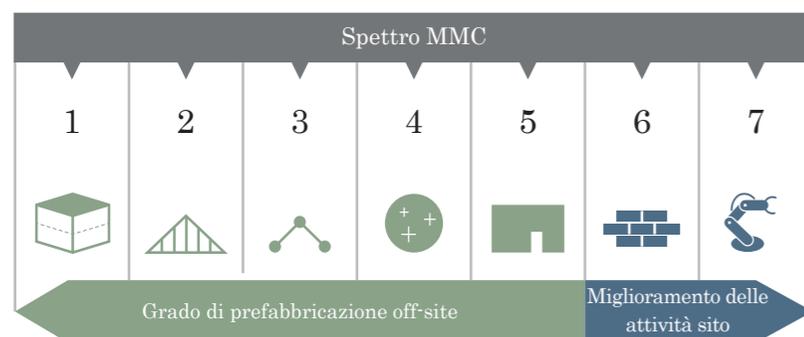
³⁸ <https://www.archdaily.com/943366/a-guide-to-design-for-disassembly>

³⁹ <https://archello.com/news/a-modular-and-nomadic-wooden-nursery>

⁴⁰ Smith, R. E. (2010). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

I Modern Methods of Construction, MMC, propongono l'introduzione di **modelli costruttivi innovativi, digitalmente integrati** e orientati all'efficienza, alla qualità e alla sostenibilità, tra cui troviamo appunto le strategie Off-Site e soluzioni strettamente connesse a questa come i **componenti modulari, la progettazione integrata** e processi ispirati all'industria manifatturiera. L'architettura Off-Site consente l'adozione di componenti prefabbricati, modulari e potenzialmente disassemblabili secondo i principi del Design for Disassembly e della progettazione reversibile.⁴¹

Il concetto di MMC va oltre l'introduzione di nuove tecnologie materiali o digitali, introducendo una **trasformazione complessiva del processo edilizio**, ispirata ai principi dell'industria manifatturiera e della **Lean Production**⁴². La definizione che maggiormente esplica la natura dei MMC è stata proposta dal governo britannico nel documento *“Modern Methods of Construction - A Working Definition”*, nel quale vengono articolate sette categorie che spaziano dalla prefabbricazione volumetrica tridimensionale alla produzione in situ con approcci avanzati.⁴³



Gamma di approcci che spazia dalla preproduzione off-site, near-site e on-site, ai miglioramenti dei processi e alle applicazioni tecnologiche.

Fonte: Rielaborazione dell'autore grafico UK Ministry of Housing, Communities & Local Government (2019). Modern Methods of Construction: A Definition Framework

41 Ryan E. Smith & J. D. Quale (2017). *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge.

42 Gibb, A. G. F., & Pendlebury, M. (2006). Modern Methods of Construction in the UK: Agenda for Action. Buildoffsite Report.

43 UK Ministry of Housing, Communities & Local Government (2019). Modern Methods of Construction: A Definition Framework. < https://www.cast-consultancy.com/wp-content/uploads/2019/03/MMC-I-Pad-base_GOVUK-FINAL_SECURE.pdf >

La classificazione⁴⁴ propone:

- **Prefabbricazione di sistemi strutturali 3D**, moduli tridimensionali interamente prodotti in fabbrica e assemblati in cantiere;
- **Prefabbricazione di sistemi strutturali 2D**, elementi bidimensionali strutturali pannelli che compongono la struttura dell'edificio;
- **Componenti strutturali prefabbricati non sistematici**, componenti strutturali non facenti parte di un sistema integrato;
- **Additive manufacturing e tecnologie digitali**, produzione mediante stampa 3d di componenti o elementi edilizi;
- **Componenti non strutturali**, assemblaggi non strutturali prefabbricati come celle bagno o cucina, impiantistica pre-assemblata;
- **Metodi innovativi on-site**, prodotti edilizi tradizionali evoluti per migliorare la produttività e ridurre il lavoro in cantiere;
- **Innovazioni nei processi in cantiere per produttività e sicurezza**, miglioramenti nei processi in cantiere come robotica, digitalizzazione, ottimizzazione del flusso di lavoro.

All'interno di questo scenario, l'architettura Off-Site occupa un ruolo fondamentale per lo **sviluppo e la realizzazione** di parte delle componenti classificate. Essa è caratterizzata dal trasferimento in stabilimento della maggior parte delle fasi costruttive e questo implica che il luogo in cui avviene la "realizzazione dell'edificio" cambia e passa dall'essere il cantiere ad un posto controllato, lo stabilimento, dove la produzione dei componenti edilizi vengono fabbricati e in base alle tipologie di componenti descritte in precedenza, possono essere preassemblati, dotati di impiantistica e collaudati, per poi essere trasportati in sito e montanti in tempi brevi.⁴⁵

44 <https://www.gov.uk/government/publications/modern-methods-of-construction-working-group-developing-a-definition-framework>

45 Nei capitoli successivi vedremo come la prefabbricazione non consista nella realizzazione di edifici in stabilimento, bensì della produzione di componenti e sistemi costruttivi.

I modelli costruttivi tradizionali si sviluppano secondo una **logica lineare e frammentata**, in cui le diverse fasi, dalla progettazione alla realizzazione in cantiere, si sviluppano in una **logica temporale lineare**, rallentata da discontinuità organizzative. Diversamente da questa logica, le strategie Off-Site consentono un'**organizzazione parallela e sinergica** dalle fasi progettuali e realizzative fondamentali per la costruzione di un edificio. Con queste strategie, la **collaborazione** tra le diverse **fasi progettuali e produttive** è essenziale per la definizione di un'architettura che integra al suo interno differenti **componenti** che vengono prodotte in un **sistema industrializzato**. I progettisti che si occupano del design architettonico devono **collaborare in modo sinergico e continuo** con le figure che si occupano del design strutturale, della fase produttiva o coloro che si occupano dell'integrazione impiantistica.⁴⁶

La **collaborazione** deve avvenire anche tra i vari **progettisti** e le figure che si occupano della progettazione dei **componenti industrializzati** che vengono prodotti in quanto risulta come condizione essenziale per sviluppare un progetto di un'architettura **coerente** con gli stessi principi dell'Off-Site. L'organizzazione parallela e la collaborazione sinergica degli attori che partecipano ad un progetto Off-Site è in opposizione all'organizzazione verticale che caratterizza l'approccio progettuale dei modelli costruttivi tradizionali, dove le scelte e gli aspetti progettuali si riversano a cascata dal progettista fino alle figure presenti in cantiere. Il flusso di informazioni dal proprietario all'architetto e all'appaltatore, dall'architetto all'ingegnere e all'appaltatore e dall'appaltatore al costruttore, tipico della **struttura verticale** può ridurre le opzioni di comunicazione tra il team di progettazione e il team di prefabbricazione.⁴⁷

46 Smith, R. E. (2010). Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction. John Wiley & Sons

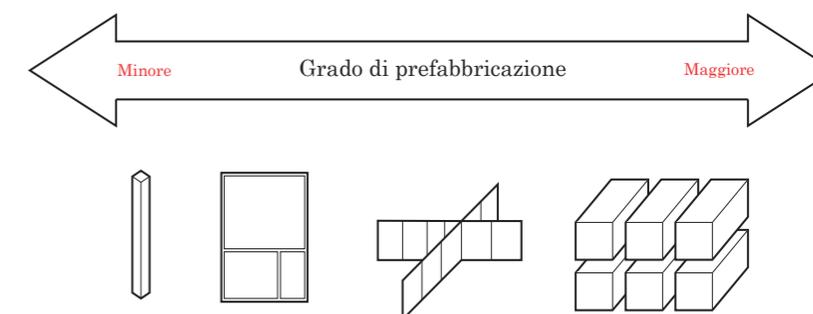
47 Ibidem

L'integrazione suggerisce un'**organizzazione orizzontale**, permettendo lo scambio di informazioni tra le parti interessate⁴⁸ il che, in un progetto di architettura Off-site, permette di ottenere vantaggi evidenti⁴⁹ come:

- **Riduzione** dei tempi di cantiere fino al 50%;
- **Minore** produzione di rifiuti e ridotto impatto ambientale;
- **Miglioramento** della sicurezza sul lavoro e condizioni operative ottimali;
- **Controllo** della qualità e tracciabilità dei componenti.

Questi aspetti vantaggiosi sono resi possibili grazie all'industrializzazione dei componenti utilizzati nei progetti di architettura Off-Site che possono essere differenziati in tre livelli principali:

- **Componenti monodimensionali**, come travi, pilastri ed elementi lineari;
- **Sistemi bidimensionali**, come pannelli di parete, solai o coperture;
- **Moduli tridimensionali volumetrici**, unità abitative complete o parti, blocchi bagno o singole stanze.



Rielaborazione dell'autore del grafico sul grado di prefabbricazione estratto dal libro di Ryan E. Smith "Prefab Architecture - A Guide to Modular Design and Construction"

48 Ibidem

49 Bertram, n., Fuchs, s., Mischke, j., Palter, r., Strube, g., Woetzel, l., *Modular construction: From projects to products*, McKinsey & Company, 2019, < <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/modular-construction-from-projects-to-products> >

I componenti **monodimensionali** sono elementi lineari come travi, pilatri, montanti e longheroni. Dal punto di vista architettonico, questi elementi offrono ampia **liberà compositiva** permettendo di articolare lo spazio attraverso passi strutturali che rispondono alle esigenze del progettista ed è possibile realizzare telai senza particolari vincoli. L'alta libertà compositiva è data dal ridotto grado di prefabbricazione e questo comporta un lavoro maggiore in cantiere dove i componenti vengono assemblati manualmente tramite giunzioni a secco. Si tratta di una prefabbricazione "aperta", caratterizzata dalla flessibilità ma limitata sul controllo delle tolleranze e sui tempi di montaggio.⁵⁰



Elemento monodimensionale Rothoblaas

I componenti **bidimensionali** sono un'evoluzione importante nella direzione dell'integrazione funzionale. In questa categoria rientrano le pareti e i solai prefabbricati, prodotti sotto forma di pannelli che possono essere composti da strati strutturali, isolanti e finiture. Progettare con componenti 2D significa lavorare con un sistema costruttivo stratificato, in cui le pareti non sono solamente divisioni spaziali ma dispositivi predisposti per impianti, per l'isolamento, per il posizionamento di serramenti e finiture.⁵¹ L'adozione di queste tipologie di componenti 2D nella progettazione richiede accortezze e impone una progettazione anticipata e altamente coordinata, supportata da software BIM e da metodologie DfMA. Dal punto di vista architettonico, questo implica una ridefinizione del livello di dettaglio progettuale, in quanto, la soluzione costruttiva per giunzioni o altri aspetti, non può essere lasciata alle decisioni di cantiere ma deve essere una scelta progettuale codificata, verificata e ottimizzata prima della produzione dei componenti.



Elemento bidimensionale prefabbricato telaio in legno.

I componenti **tridimensionali** rappresentano il più avanzato grado di prefabbricazione. Questi sono moduli volumetrici completamente finiti in stabilimento, che includono struttura, involucro, arredi e finiture. Sono vere e proprie unità spaziali trasportabili che possono essere assemblate tra loro per formare edifici modulari, spesso a più piani. Questa tipologia di componente consente tempi di costruzione ridotti alla giunzione tra i moduli e un controllo della qualità elevato, ciò comporta però una progettazione rigidamente definita e una



Elemento tridimensionale prefabbricato realizzato per il progetto Puukuokka housing block, OOEPEA.

Fonti immagini:

In alto: Sito web Rothoblaas

In mezzo: Sito web Architettura ecosostenibile.it

In basso: Sito web OOEPEA

logistica di cantiere altamente efficiente. Dal punto di vista architettonico l'utilizzo di moduli 3D solleva il rischio di omologare formalmente e standardizzare l'edificio realizzato.⁵² L'evoluzione nella progettazione parametrica e l'utilizzo dei moduli con il supporto di software BIM per il Digital Twins, ha permesso di garantire la possibilità espressiva e l'articolazione architettonica degli edifici composti da componenti 3D.⁵³

Ogniuna di queste configurazioni presenta diversi gradi di prefabbricazione e personalizzazione ma ciò che accomuna tutte le declinazioni dell'Off-Site è la logica di sistema per cui, secondo **Leggins, Stehn ed Ekholm**⁵⁴, *l'edilizia industrializzata può essere intesa come un sistema strutturato in cui gli edifici vengono realizzati tramite l'assemblaggio di unità o componenti standardizzati e interoperabili, progettati per integrarsi in un flusso produttivo industriale e gestiti attraverso strumenti digitali avanzati*. Il valore strategico dell'architettura Off-Site risiede dunque nella possibilità di operare una **sintesi tra industrializzazione e qualità architettonica**, superando la dicotomia che per lungo tempo ha opposto la prefabbricazione alla qualità compositiva architettonica.

La combinazione tra sistemi costruttivi leggeri e modulari, materiali innovativi e strumenti digitali, è possibile ottenere architetture con **processi standardizzati che permettono una personalizzazione di massa**, concetto che incarna la **Mass Customization** applicata all'architettura.⁵⁵ L'adozione delle strategie Off-Site si lega strettamente agli obiettivi di sostenibilità promossi dall'Unione Europea, come il Green Deal e il New European Bauhaus, in quanto permette un uso più efficiente delle risorse, la riduzione delle emissioni di CO₂ incorporate attraverso materiali bio-based e l'introduzione di principi di economia circolare nel ciclo di vita dell'edificio.⁵⁶

⁵² Smith, R. E. (2010). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. Wiley.

⁵³ Ibidem

⁵⁴ Lessing, J., Stehn, L., & Ekholm, A. (2005). Industrialised housing: definition and categorization of the concept. IAARC Proceedings.

⁵⁵ Bock, T., & Linner, T. (2015). *Robot-Oriented Design: Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction*. Cambridge University Press.

⁵⁶ European Commission (2021). *New European Bauhaus: beautiful, sustainable, together*.

⁵⁰ Smith, R. E. (2010). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. John Wiley & Sons

⁵¹ Ibidem

1.5 IL RUOLO DELL'INDUSTRIALIZZAZIONE NEI SISTEMI COSTUTTIVI PREFABBRICATI LEGGERI

Le strategie Off-Site sono lo strumento per la realizzazione di architetture prefabbricate leggere che permettono di applicare gli approcci visti ma per attuarle è fondamentale l'**industrializzazione dei sistemi costruttivi**. Per questa ragione, il tema dell'industrializzazione assume un **ruolo strategico** imprescindibile per la realizzazione di architetture Off-Site. L'architettura, tradizionalmente radicata in una cultura **artigianale e progettuale** che pone l'unicità del manufatto e il ruolo autoriale del progettista, si confronta oggi con un cambiamento di paradigma, **da opera unica a sistema produttivo**, da progetto one-off a **piattaforma adattabile**. L'industrializzazione si inserisce in questo processo come **strumento abilitante**, capace di rispondere alle esigenze contemporanee di **scalabilità, precisione, sostenibilità e integrazione tecnologica**.⁵⁷

I materiali assumono un ruolo fondamentale all'interno dell'architettura Off-Site e dei processi di industrializzazione edilizi. Negli ultimi decenni, materiali come il **legno lamellare** e il **cross-laminated timber** sono risultati compatibili con i processi industrializzati per la produzione di sistemi costruttivi e, per questa ragione e per gli incentivi normativi per supportare una transizione sostenibile, i **materiali lignei** sono emersi come una delle **soluzioni compatibili** e con **diverse applicazioni** per la realizzazione di architetture Off-Site. L'utilizzo di **macchinari CNC** ha reso possibile una nuova generazione di costruzioni prefabbricate che combinano **personalizzazione e serialità, design architettonico e ottimizzazione industriale**.

Tuttavia, l'adozione dell'industrializzazione in edilizia non è un processo semplice e lineare. A differenza di settori altamente automatizzati come quello automobilistico, l'edilizia deve confrontarsi con una **complessità contestuale** unica dovuta al fatto che ogni edificio è situato in un luogo specifico, sottoposto a vincoli normativi e ambientali irripetibili e questo rende impossibile una piena serializzazione del prodotto finale.⁵⁸ Per quanto riguarda il settore delle costruzioni, ciò che può essere **serializzato e industrializzato sono i componenti, i sottosistemi e i processi**. L'approccio industriale non significa dunque omologazione progettuale, ma al contrario richiede un nuovo **tipo di intelligenza progettuale**, capace di sfruttare i vantaggi della ripetibilità tecnica senza rinunciare alla qualità architettonica.

⁵⁷ Smith, R. E. (2010). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. Wiley.

⁵⁸ Smith, R. E., & Quale, J. D. (2017). *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge.

Questo valore viene anche sostenuto da Ryan E. Smith, "***l'industrializzazione dell'architettura Off-Site rappresenta un'opportunità per migliorare il design***", attraverso una maggiore integrazione tra progettazione, produzione e assemblaggio, riducendo sprechi, errori e inefficienze.⁵⁹

Per raggiungere questi livelli di integrazione, l'industrializzazione contemporanea non può essere pensata senza l'apporto delle tecnologie digitali. L'integrazione del **BIM**, Building Information Modeling, della **fabbricazione robotizzata**, dalla **logistica avanzata** e dei sistemi di **monitoraggio e manutenzione preventiva**, stanno aprendo scenari inediti nella gestione dell'intero ciclo di vita dell'edificio. L'attuazione di questi strumenti permette di affrontare il tema della **Productization of Architecture**, ovvero la capacità di pensare l'architettura come prodotto sistemico, configurabile, replicabile e sostenibile.⁶⁰ La trasposizione di questi temi in aspetti concreti comporta affermare che l'industrializzazione in architettura non significa solo automatizzare la produzione ma **ridefinire la relazione tra progetto e costruzione**, tra forma e tecnica, tra soggetto progettante e attori della produzione. L'industrializzazione fornisce l'opportunità di trasformare il cantiere da luogo di improvvisazione a piattaforma logistica, e per restituire all'architettura una dimensione sistemica e collaborativa adatta alle sfide complesse del nostro tempo.⁶¹

Per fare questo e passare da una costruzione artigianale a una costruzione industrializzata l'architettura si confronta con il paradigma della **scomposizione dell'edificio in componenti standardizzati**. Questa concezione implica una definizione dell'opera architettonica differente, che non vede più l'edificio come un insieme unico da costruire in loco, ma come un **sistema composto da parti coordinate**, progettate per essere prodotte in fabbrica e assemblate in sito. La classificazione più comune per i componenti del sistema è la classificazione che li distingue in funzione della loro dimensionalità, quindi: **monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali**, legata alla **logica progettuale e al livello di complessità**, ma vi è una classificazione più tecnica proposta da Roger-Bruno Richard nel testo *Off-Site Architecture*.

⁵⁹ Ibidem

⁶⁰ Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction*. McGraw-Hill.

⁶¹ Bock, T., & Linner, T. (2015). *Robot-Oriented Design: Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction*. Cambridge University Press.

L'architetto propone una lettura dei sistemi prefabbricati in base al **grado di lavoro trasferito dal cantiere allo stabilimento** in quanto fattore caratterizzante il sistema. Il passaggio da 1D a 3D rappresenta una progressiva estensione del controllo industriale sul processo edilizio in quanto **maggiore è la complessità** del componente, minore sarà l'attività in sito ma avrà un costo maggiore la sua produzione e sarà necessaria una maggiore progettazione integrata e rigidità progettuale.⁶² Questo comporta per l'architetto, non essere più soltanto autore di forma e spazio, ma anche assumere un ruolo da regista per quanto riguarda il sistema costruttivo, ruolo per cui è chiamato a prendere decisioni coerenti con le logiche produttive, logistiche ed economiche dell'intervento.⁶³

Nella pratica architettonica contemporanea, la distinzione tra componenti 1D, 2D, 3D non è rigida in quanto si verifica una **scelta di sistemi ibridi**, dove le tre tipologie vengono combinate in funzione dei vantaggi progettuali che possono fornire. La logica ibrida di differenziare la tipologia di componenti permette la progettazione di architetture in cui, la **struttura primaria** è realizzata con **componenti monodimensionali**, come travi e pilastri, le **partizioni e le chiusure** con **pannelli bidimensionali o a telaio**, e alcuni **spazi tecnici o ripetitivi** con **moduli tridimensionali**, ad esempio, per blocchi bagno o nuclei impiantistici. Questa combinazione permette di bilanciare **efficienza produttiva e flessibilità architettonica**, dimostrando come l'industrializzazione, attraverso la combinazione di componenti, pur entro i limiti imposti dalle logiche industriali, può rappresentare un'opportunità progettuale per realizzare architetture con alte prestazioni, con un ridotto impatto ambientale e accorciando i tempi di realizzazione.⁶⁴

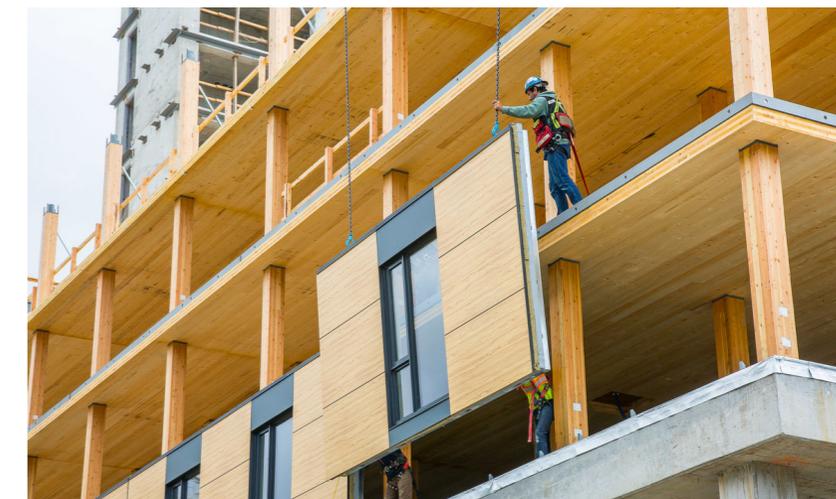
62 Richard, R. B. (2017). "Categorization of Industrialized Building Systems." In Smith, R. E., & Quale, J. D. (Eds.), *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge.

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

64 Ibidem

Le differenti tipologie di componenti sono parte del **sistema costruttivo** industrializzato il quale, assume un ruolo di **infrastruttura metodologica** che condiziona l'intero processo, dalla progettazione alla produzione dell'architettura industrializzata. Nell'architettura esso rappresenta la soluzione tecnica con cui viene realizzato fisicamente l'edificio ma quando si affronta l'industrializzazione, il sistema costruttivo è declinato anche come **linguaggio operativo** con cui l'intero processo progettuale e produttivo si interfaccia. Per definizione, un sistema costruttivo industrializzato è un insieme coerente e coordinato di componenti, tecnologie e regole che consentono la realizzazione di edifici secondo una logica replicabile, ottimizzata e idealmente flessibile.⁶⁵ Attraverso la distinzione tra **sistemi aperti, chiusi ed ibridi**, Roger-Bruno Richard ha costituito una chiave interpretativa per comprendere la varietà delle strategie costruttive Off-Site e le loro implicazioni architettoniche.⁶⁶

Il progetto **Brock Commons Tallwood House**, progettato da *Acton Ostry Architects e Architekten Hermann Kaufmann* è un esempio dell'applicazione di un sistema ibrido, che ha permesso di concretizzare la volontà di creare un grattacielo in legno massiccio con prestazioni al fuoco migliori di quelli tradizionali e con una significativa riduzione delle tempistiche grazie alla prefabbricazione dei componenti.



Brock Commons Tallwood House, 2013
Acton Ostry Architects, Architekten Hermann Kaufmann

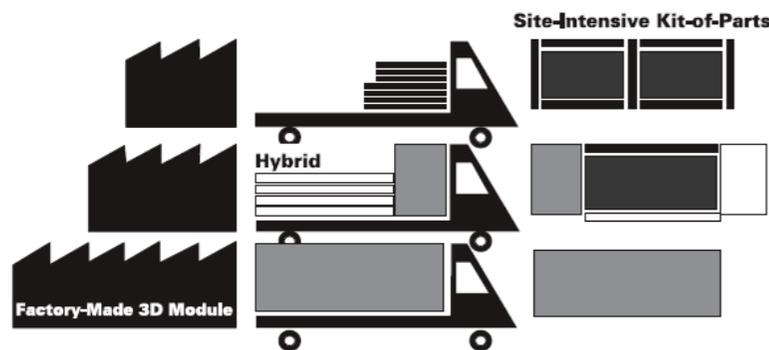
Fonte immagine: <https://www.world-architects.com/it/hk-architekten-hermann-kaufmann-and-partner-zt-gmbh-schwarzach/project/brock-commons-tallwood-house>

65 Gibb, A. G. F. (1999). *Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation*. Wiley-Blackwell.

66 Richard, R. B. (2017). "Categorization of Industrialized Building Systems." In Smith, R. E., & Quale, J. D. (Eds.), *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge.

L'autore propone la definizione dei tre sistemi in funzione del livello di intercambiabilità del sistema rispetto ad altri componenti utilizzati nel sistema costruttivo industrializzato e di quanto lavoro viene realizzato in stabilimento o in sito di cantiere:

- **Modulo tridimensionale prefabbricato in stabilimento:** rappresenta il punto massimo che si può raggiungere con l'industrializzazione dei sistemi costruttivi. L'edificio viene suddiviso in moduli che possono essere completati direttamente in stabilimento e poi inviati in cantiere per essere facilmente collegati tra loro. Questa tipologia di sistema può essere definita come sistema **chiuso**.
- **Sistemi a componenti con elevata intensità di lavoro in sito.** Questi sistemi prevedono un basso grado di complessità nei componenti utilizzati e ciò comporta una quantità di lavoro in cantiere maggiore in quanto deve avvenire l'assemblaggio di componenti e sottosistemi forniti da diversi produttori. Il sistema può essere definito come sistema **aperto**.
- **Ibrido.** Questa categoria prevede che le parti più complesse dell'edificio vengano prodotte in stabilimento e assemblate con altre componenti e sistemi in sito. questo sistema viene definito un sistema costruttivo ibrido.



Tre categorie dei sistemi costruttivi ingegnerizzati

Fonte: Industrialized building system categorization, Roger-Bruno Richard - Offsite Architecture, Constructing future di Ryan E. Smith e Jhon D. Quale

In particolare, il **sistema chiuso** è caratterizzato da un elevato grado di integrazione interna e da un elevato grado di integrazione interna e da una bassa possibilità di intercambiabilità con elementi esterni. I componenti e sottosistemi che costituiscono questa tipologia di sistema, come elementi strutturali, di involucro, giunzioni e impianti, sono progettati e prodotti per funzionare solamente all'interno di quel determinato sistema. Questo approccio permette un alto grado di controllo sulla produzione e facilita l'automazione dei processi, assicurando efficienza esecutiva, ma questo limita fortemente la flessibilità progettuale.⁶⁷ L'architettura prodotta con sistemi chiusi rischia di essere condizionata dalle logiche produttive e può tendere ad assumere forme standardizzate e ripetitive. La prefabbricazione di massa avvenuta nel dopoguerra, criticata per monotonia e bassa qualità architettonica, ha visto un largo utilizzo di questi sistemi costruttivi chiusi.⁶⁸

L'alternativa opposta sono i **sistemi aperti**, in cui i componenti sono progettati secondo criteri di modularità, compatibilità e intercambiabilità. I componenti che costituiscono questa tipologia di sistema possono essere prodotti da diversi fornitori diversi, possono essere utilizzate in differenti progetti ed essere sostituite nel tempo e questi possono essere travi, pilastri, pannelli o moduli.⁶⁹ Il sistema aperto presenta vantaggi quali una **maggiore personalizzazione** e una facilitata manutenzione e riuso dei componenti, questo aspetto lo avvicina quindi alla **logica del design circolare**. Per ottenere questi vantaggi, è richiesta una standardizzazione delle interfacce, delle dimensioni e delle prestazioni, e per ottenere questo è necessario un elevato livello di coordinamento progettuale e normativo.⁷⁰ I sistemi aperti permettono ai professionisti di realizzare architetture diversificate e adattabili in quanto la logica alla loro base permette la valorizzazione della **flessibilità** e la **reversibilità** degli edifici.

⁶⁷ Richard, R. B. (2017). "Categorization of Industrialized Building Systems." In Smith, R. E., & Quale, J. D. (Eds.), *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge.

⁶⁸ Ibidem

⁶⁹ Ibidem

⁷⁰ Gibb, A. G. F. (1999). *Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation*. Wiley-Blackwell.

I **sistemi ibridi** sono una via di mezzo tra i primi due, combinano, per rispondere alle esigenze specifiche di ogni progetto, elementi chiusi e aperti. A livello pratico, i sistemi ibridi possono prevedere un **nucleo strutturale prefabbricato chiuso**, come una cellula impiantistica o un sistema distributivo, integrato ad **elementi aperti** come un involucro a pannelli modulabili e personalizzabili. I vantaggi di questa tipologia di sistemi sono la possibilità di **ottimizzare le fasi critiche del processo edilizio**, come la gestione impiantistica, **garantendo una libertà compositiva e architettonica**.⁷¹ Dal punto di vista progettuale, i sistemi ibridi sono una opportunità e una sfida, in quanto richiedono una progettazione integrata, l'uso di strumenti digitali avanzati e una solida collaborazione tra i diversi attori della filiera. La sfida aggiuntiva rispetto agli altri due sistemi è la coordinazione tra componenti della filiera e fornitori dei componenti, i quali devono combaciare.

Nella sua dimensione teorica e operativa, la scelta tra un sistema aperto o chiuso, riflette due visioni diverse dell'architettura industrializzata. La scelta del sistema chiuso ha il fine di cercare la massima ottimizzazione attraverso la ripetibilità e il controllo, la scelta verso quello aperto riflette una visione che punta sulla flessibilità, sull'adattabilità e sul progetto come processo dinamico. L'adozione di una logica ibrida mette in dialogo queste due visioni conciliando le esigenze della produzione industriale con le specificità dell'architettura come disciplina interpretativa e creativa.⁷²

71 Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction*. McGraw-Hill

72 Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling*. Wiley.

File-To-Factory

Questo processo, sviluppato negli anni '90, ha introdotto nel settore delle costruzioni, nell'architettura e nel design industriale un'innovazione relativa all'integrazione tra progettazione e produzione. Grazie alla progettazione digitale, un file digitale può passare dalla fase di progettazione alla realizzazione fisica data dai processi di produzione. Questo è reso possibile dalla digitalizzazione della progettazione coordinata all'utilizzo di macchinari a controllo numerico per la realizzazione di prodotti personalizzati e prefabbricati, migliorando l'efficienza e la possibilità di personalizzazione di massa dei prodotti. Si ha quindi un legame tra progettazione digitale e fabbricazione industrializzata.

La concezione dei sistemi costruttivi come linguaggio operativo comporta una **trasformazione strutturale** della progettazione, da attività prevalentemente rappresentativa e descrittiva, con questa logica assume un ruolo nei processi che la vede come una **piattaforma operativa e interattiva**, capace di governare i processi di ideazione, progettazione, assemblaggio e gestione dell'edificio lungo tutto il suo ciclo di vita. Per supportare questo cambiamento, l'utilizzo del **BIM, Building Information Modeling** assume un ruolo fondamentale, non solo per il supporto tecnico che fornisce ma come fattore per l'attuazione di un paradigma progettuale. Il disegno ha assunto, nella progettazione architettonica tradizionale attraverso elaborati 2D, il compito di documentare l'interazione progettuale e gli strumenti a supporto non sempre garantivano che ciò avvenisse in maniera esaustiva. Il BIM invece, consente di costruire modelli digitali tridimensionali in cui le **informazioni sono integrate e ogni elemento architettonico** è associato ad un set di dati geometrici, prestazionali, materici, temporali ed economici. Il supporto tecnico che fornisce il BIM permette una **interoperabilità** tra i diversi attori della filiera, la simulazione di scenari costruttivi e la generazione automatica di output per la fase progettuale e produttiva.⁷³

Nell'architettura Off-Site il progetto non è più uno strumento di comunicazione ma diviene l'elemento generativo dell'intero processo produttivo. L'architettura, scomposta in componenti prefabbricati, trova un corrispettivo all'interno del modello BIM e questo permette un processo **File-To-Factory** dove, le informazioni riguardo i componenti prefabbricati del modello vengono trasmesse alla fase di produzione industrializzata, dove la traduzione dei dati viene inserita nei macchinari a controllo numerico. Questa **trasmissione di informazioni** tra la fase progettuale e la fase produttiva attraverso un linguaggio e una piattaforma comune permette di evitare le ridondanze, gli errori o la perdita di informazioni. Questo aspetto è centrale nella tesi di Smith e Quale, che sottolineano come l'architettura industrializzata richieda che le **decisioni progettuali** vengano **anticipate e integrate** fin dalle fasi iniziali, superando la concezione tradizionale che riduce il progetto ad una sola rappresentazione finale.⁷⁴

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

74 Smith, R. E., & Quale, J. D. (2017). *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge.

L'utilizzo del BIM, oltre alla gestione delle informazioni inerenti al progetto e dei suoi componenti, permette di **gestire le complessità** di un progetto dal punto di vista **compositivo**, attraverso una gestione delle geometrie in un modello digitale, sia per quanto riguarda le **complessità di prefabbricazione** e **integrazione impiantistica**, attraverso la modellazione digitale di componenti di connessione, la reiterazione delle soluzioni definite per un set di casistiche e l'integrazione impiantistica in componenti prefabbricate.

Il cambiamento del progetto architettonico come sistema operativo vede la modellazione informativa, BIM, come condizione necessaria ma non sufficiente a garantire l'efficienza e la coerenza del processo costruttivo. Altro fattore necessario per supportare questo cambiamento è la **metodologia** per cui la progettazione non si limiti a rappresentare l'edificio ma che **fornisca gli strumenti per anticipare la sua fabbricazione e montaggio**, in stretta interazione con la logica produttiva. La metodologia del Design for Manufacturing and Assembly, **DfMA**, consente di **concepire l'edificio** non solo come un'opera costruita ma come un **prodotto da assemblare**, progettato per essere fabbricato e montato con precisione, riducendo sprechi, costi ed errori. L'applicazione di questa metodologia nell'architettura rappresenta uno dei passaggi più rilevanti nella transizione verso un'edilizia industrializzata, efficiente e sostenibile. Derivato dall'industria manifatturiera, in particolare automobilistica, il DfMA propone un approccio progettuale basato sulla fabbricabilità e sull'assemblabilità, ovvero sulla capacità di **concepire componenti e sistemi** che possano essere **prodotti in stabilimento con processi ottimizzati** e **assemblati in cantiere** in modo rapido, preciso e sicuro.⁷⁵

La prefabbricazione implica una scomposizione dell'edificio in componenti standardizzati, modulari e ripetibili che devono essere pensati fin dalle prime fasi del progetto in relazione ai vincoli di produzione e ai protocolli di montaggio. L'adozione del DfMA permette di anticipare nel progetto le logiche di fabbrica, riduce le interferenze in cantiere, le modifiche in corso d'opera e gli scarti di produzione.⁷⁶

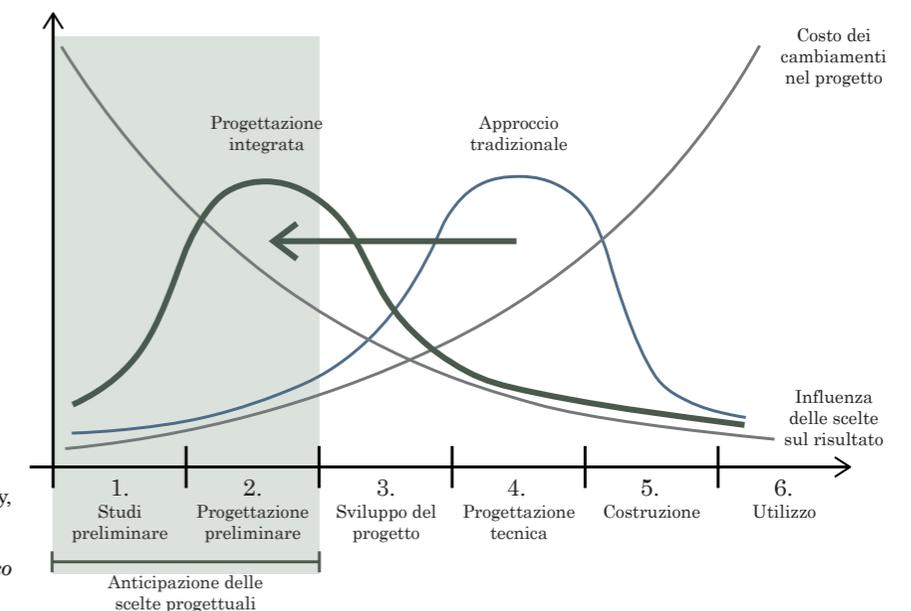
⁷⁵ Gibb, A. G. F. (1999). Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularization. John Wiley & Sons.

⁷⁶ Smith, R. E. (2010). Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction. Wiley.

L'impiego di software BIM e le metodologie DfMA sono strumenti utili per la gestione del progetto integrata, anche detta Integrated Project Delivery, IPD. Gestione che si basa sull'approccio collaborativo di tutte le figure coinvolte, si basa sulla condivisione delle informazioni e permette una sovrapposizione delle fasi di progetto. Questo approccio progettuale permette di anticipare le scelte progettuali con una grande influenza sul progetto nelle fasi preliminari, così che il costo per le modifiche progettuali sia minimo. La curva Effort vs Effect di Patrick MacLeamy esprime come, spostando le scelte progettuali nelle fasi preliminari si possa ridurre il costo delle modifiche progettuali. L'industrializzazione dei componenti e dei sistemi costruttivi richiede questa anticipazione, in questo modo, i tempi per la fase progettuale aumentano ma durante questo tempo verranno prese tutte le scelte progettuali che impattano di più sul risultato, diminuendo i costi di questo.⁷⁷

Curva Effort vs Effect, Patrick MacLeamy, HOK.

Fonte: Rielaborazione dell'autore del grafico realizzato da Patrick MacLeamy



⁷⁷ <http://ingegno-web.it/articoli/costruzione-virtuale-e-progettazione-dfma-integrata/>

1.6 I SISTEMI COSTRUTTIVI PREFABBRICATI IN LEGNO E STRATEGIE OFF-SITE

Legno ingegnerizzato

A partire dagli anni duemila, si è sviluppato come evoluzione tecnologica del legno massiccio, è costituito da prodotti lignei ottenuti mediante processi di incollaggio e pressatura di strati, fibre o pannelli di legno. La definizione “ingegnerizzato” è dovuta al fatto che sono componenti progettate per aumentare le prestazioni meccaniche, dimensionali, fisiche e di durabilità. Le tipologie possono essere: legno lamellare (GLT), Cross-Laminated Timber (CLT), Laminated Veneer Lumber (LVL), pannelli OSB, e altri. Le loro caratteristiche principali e migliorative rispetto al legno massiccio sono: resistenza, versatilità, leggerezza, precisione, resistenza meccanica e possibilità di supportare soluzioni costruttive industrializzate e sostenibili.



Produzione di pannelli CLT

Fonte: <https://mercermasstimber.com/2023/03/20/mass-timber-construction-a-comprehensive-guide/>

La trasposizione dei principi di industrializzazione nel settore edilizio comporta un'attenta riflessione sui sistemi costruttivi e allo stesso modo sui materiali, in quanto questi devono **garantire prestazioni tecniche elevate, facilità di prefabbricazione e compatibilità con i processi Off-Site**. Tra le possibilità disponibili sul mercato che assecondano le logiche di prefabbricazione e industrializzazione, il **legno ingegnerizzato** emerge come una soluzione strategica, in quanto dà la possibilità di garantire leggerezza, resistenza strutturale e sostenibilità ambientale. Questo materiale, oltre ad adattarsi alla produzione modulare e alla logica dei componenti prefabbricati, consente di **integrare** in modo efficace gli strumenti digitali e le metodologie progettuali avanzate, come il **BIM** e il **DfMA**. La sostenibilità ambientale è un fattore che ha un peso rilevante nella scelta in quanto, in linea con la transizione ecologica europea, il legno ingegnerizzato rappresenta una **soluzione bio-based** in linea con le disposizioni di **circolarità e decarbonizzazione**.

Il legno ingegnerizzato, di cui si parla quando si trattano i temi di **sistemi costruttivi prefabbricati in legno**, è un **materiale di origine naturale** che, secondo le normative europee, viene trasformato per ottenere un **materiale composito** con prestazioni tecniche e strutturali migliori grazie alla **stratificazione, unione o inserimento di componenti** migliorative. Questo materiale risulta, nonostante le lavorazioni, rinnovabile e capace di immagazzinare anidride carbonica, durante la crescita dell'albero, contribuendo così alla riduzione delle emissioni di gas effetto serra del settore delle costruzioni. Questa argomentazione non è sufficiente per dimostrare che i componenti prefabbricati lignei siano una scelta virtuoso, in quanto, alcuni studi sostengono che il loro impatto è maggiore di quello testimoniato.⁷⁸ Gli aspetti che sono difficilmente contestabili sono invece le caratteristiche dei componenti lignei.

⁷⁸ Searchinger T., Peng L., Waite R., Zions J., (2023) Wood Is Not the Climate-friendly Building Material Some Claim it to Be. World Resources Institute < <https://www.wri.org/insights/mass-timber-wood-construction-climate-change> >

La **leggerezza**, se rapportata ad altri materiali da costruzione come l'acciaio o il calcestruzzo, si dimostra **funzionale** per il **trasporto e l'assemblaggio** in cantiere e quindi particolarmente adatto all'architettura Off-Site. Le **prestazioni** termofisiche, a parità di quantità di materiale, sono **migliori rispetto a materiali tradizionali** e quindi questo, unito alle alte prestazioni strutturali raggiunte dai prodotti in legno ingegnerizzato, permette di **ridurre la quantità di materiale utilizzato**, gli sprechi di materiale e le emissioni date dalla produzione dei materiali da costruzione.

A partire dagli anni Duemila, lo sviluppo di sistemi costruttivi in cui vengono utilizzati componenti lignei ingegnerizzati come il **Cross-Laminated Timber**, CLT, il **Gulam Laminated Veneer Lumber**, LVL, e il **Nail-Laminated Timber**, NLT, ha reso il legno un materiale da costruzione strutturale **competitivo anche per edifici multipiano** residenziali e non, per le politiche di decarbonizzazione del settore delle costruzioni e allo sviluppo di sistemi innovativi e digitalizzati.⁷⁹ Questi componenti presentano caratteristiche dimensionali e prestazionali costanti, sono adatti alla lavorazione e garantiscono **elevati standard di sicurezza, resistenza sismica e durabilità**, e vengono certificati e collaudati a livello industriale, garantendo un livello qualitativo costante e non necessitano di collaudi successivi. Il legno ingegnerizzato offre inoltre eccellenti proprietà di isolamento termico e acustico in soluzioni costruttive che richiedono, di norma, una minore quantità di materiale e un peso strutturale minore. Questi aspetti risultano compatibili con i principi di progettazione passiva e si adatta facilmente ai protocolli ambientali più avanzati come il LEED, BREEAM, FSC o PEFC, contribuendo agli obiettivi di sostenibilità europei ed internazionali e permettono di ottenere finanziamenti per la loro realizzazione in alcuni Paesi europei.⁸⁰

⁷⁹ Espinoza, O., Buehlmann, U., & Smith, P. M. (2016). Cross-laminated timber: Status and research needs in Europe. *BioResources*, 11(1), 281–295. < <https://bioresearches.cnr.ncsu.edu/resources/cross-laminated-timber-status-and-research-needs-in-europe/> >

⁸⁰ UNECE/FAO (2021). *Forest Products Annual Market Review 2020–2021*. < https://unece.org/sites/default/files/2021-11/2114516E_Inside_Final_web.pdf >

Uno degli aspetti più virtuosi del legno è la sua **compatibilità con l'industrializzazione** del processo edilizio. I prodotti lignei ingegnerizzati sono fabbricati con un elevato grado di standardizzazione e precisione, ma mantengono una **flessibilità formale e prestazionale** che consente un ampio grado di personalizzazione architettonica. Questo li rende perfettamente integrabili con i principi della **Mass Customization**, consentendo di realizzare architetture uniche a partire da componenti modulabili⁸¹. Nel contesto Off-Site, il legno consente di:

- **semplificare le fasi di montaggio** in cantiere riducendo i tempi, i costi e i rischi per i lavoratori coinvolti;
- **migliorare le condizioni di lavoro** degli operai in stabilimento grazie alla leggerezza dei componenti e alle possibilità di operare in ambienti controllati
- **ridurre gli scarti** di produzione grazie ad una pianificazione digitale precisa e alla possibilità di riutilizzare gli scarti per cicli produttivi secondari.

Il legno assume quindi un ruolo rilevante nella transizione ecologica e nelle politiche UE. Nella sua declinazione ingegnerizzata e certificata, è uno dei **materiali più coerenti** con i principi del *Green Deal europeo*, che promuove l'utilizzo di risorse locali, rinnovabili e a basse emissioni di carbonio.⁸² L'uso del legno in architettura prefabbricata permette di intervenire sia sulle **nuove costruzioni** a energia quasi zero, nZEB, sia su **interventi di retrofit**, attraverso moduli leggeri, smontabili e integrabili con il costruito esistente. Il legno, inoltre, è centrale nella visione del *New European Bauhaus*, che promuove soluzioni belle, sostenibili ed inclusive attraverso **materiali naturali**, filiere locali e componenti progettati per il comfort e la qualità dell'abitare, **tutti tratti distintivi dell'architettura in legno industrializzata**.⁸³

Mass Customization

Concetto introdotto negli anni '80 da Joseph Pine, descrive la capacità di coniugare i vantaggi della produzione di massa con la personalizzazione del prodotto. Grazie all'uso di tecnologie digitali e processi industrializzati questa strategia produttiva permette la realizzazione di oggetti o sistemi standardizzati con la possibilità di adattabilità alle esigenze del singolo cliente. La trasposizione di questo modello in architettura e nella prefabbricazione permette di combinare l'efficienza e la riduzione dei costi data dalla produzione seriale con la flessibilità progettuale. Si ottiene così la realizzazione di edifici prefabbricati personalizzati basati su una logica di industrializzazione edilizia.



Render di progetto, Henning Larsen studio.

Fonte: Henning Larsen sito web



Mjøstårnet Tower, Voll Arkitekter. 2019

Fonte: Voll Arkitekter sito web

Nonostante i numerosi vantaggi, **l'impiego del legno nell'architettura Off-Site** presenta **alcune criticità** come la necessità di una filiera produttiva evoluta, dotata di competenze tecnologiche e standard adeguati, la percezione culturale ancora legata all'idea di temporaneità o fragilità del legno ed infine il tema della scalabilità industriale. Tuttavia, le prospettive di sviluppo rimangono ampie grazie alla crescita dell'impiego del legno in progetti Off-Site per edifici multipiano, dove il CLT diventa il materiale scelto per la realizzazione; il sostegno delle politiche pubbliche e l'adozione di strumenti digitali BIM, DfMA, LCA, stanno rafforzando il ruolo del legno come materiale protagonista dell'architettura industrializzata. I progetti come la **Stockholm Wood City** in Svezia o come il **Mjøstårnet Tower** in Norvegia.

Il primo è un progetto a scala urbana, che prevede la riqualificazione di una ex area industriale nella città di Stoccolma. Per la realizzazione del progetto è stato scelto, come materiale principale il Mass Timber o legno ingegnerizzato, in particolare sarà il CLT. Con una superficie di 250'000 m², la Stockholm Wood City sarà **il più grande progetto di edilizia urbana in CLT al mondo**. Il suo sviluppo mira al miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici e grazie alle prestazioni termofisiche del legno e all'autoproduzione energetica questo progetto può divenire un esempio attuabile a differenti scale. La scala di progetto e l'industrializzazione edilizia dei componenti e dei sistemi costruttivi permetteranno una riduzione dei tempi di costruzione e un controllo maggiore sul progetto architettonico ed urbano. Questo progetto è destinato a diventare il manifesto delle intenzioni in campo di soluzioni costruttive sostenibili, industrializzate e circolari in Svezia.⁸⁴

A scala architettonica, per dimostrare le possibilità architettoniche del legno ingegnerizzato e le sue prestazioni statiche e non solo, nel 2019 è stato completato il **Mjøstårnet Tower**. Progettato dallo studio Voll Arkitekter, è l'edificio in legno più alto al mondo. 85,4 metri e manifesto di come, un sistema costruttivo ibrido con componenti lignee possa essere utilizzato per edifici alti, concepiti in passato per essere realizzati solamente con materiali come acciaio e calcestruzzo.⁸⁵

81 Bock, T., & Linner, T. (2015). Robot-Oriented Design. Cambridge University Press.

82 European Commission (2019). The European Green Deal. COM(2019) 640 final.

83 European Commission (2021). New European Bauhaus: Beautiful, Sustainable, Together.

84 <https://henninglarsen.com/projects/wood-city-stockholm>

85 <https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/edificio-in-legno-piu-alto-al-mondo-e-il-mjostarnet-in-norvegia/>

Le qualità intrinseche del legno ingegnerizzato assumono più valore quando vengono messe in relazione ai processi costruttivi in cui vengono impegnate. I componenti edilizi realizzati in legno ingegnerizzato trovano **piena espressione** nella logica dell'architettura Off-Site di prefabbricazione **industrializzata** in quanto esprimono il loro potenziale riguardo alla **precisione** dei componenti, le possibilità di **assemblaggio a secco**, la **standardizzazione** e la **personalizzazione di massa**. Questi aspetti permettono quindi di **ottimizzare tempi, costi e qualità** riducendo l'impatto ambientale e per questa ragione che, oltre che i vantaggi tecnici, l'utilizzo di componenti in legno ingegnerizzato è uno strumento progettuale in grado di sostenere le strategie per la progettazione sostenibile, la circolarità e il recupero del patrimonio edilizio esistente.

I processi produttivi industrializzati alla base della realizzazione di architetture prefabbricate leggere consentono il controllo relativo alla produzione ed è possibile grazie a questo **ridurre gli scarti, ottimizzando l'utilizzo dei materiali** e aumentando la qualità costruttiva. L'attenzione verso la scelta dei materiali che porta alla scelta delle soluzioni in legno ingegnerizzato, materiale di origine naturale, rappresenta una delle risorse più promettenti in **ottica di economia circolare**.⁸⁶ L'edificio Off-site, concepito come un **sistema aperto**, capace di **evolversi nel tempo** in risposta ad esigenze differenti, trova un riferimento nella seconda metà del Novecento con il concetto di open building ed è la logica per cui si prevede un approccio progettuale che vede gli edifici come strutture capaci di **assecondare modifiche funzionali, tecnologiche o distributive senza compromettere la sua integrità d'insieme**.⁸⁷

Per trovare la piena applicazione dei principi dell'economia circolare nell'architettura Off-Site è fondamentale interrogarsi sulla natura dei materiali impiegati e quindi, analizzando questa scelta secondo le logiche dell'economia circolare, possiamo vedere come, tra i materiali impiegati nel settore delle costruzioni, il legno rappresenta in modo esemplare l'essenza della circolarità. Questo materiale si pone come **alternativa concreta e strategica ai materiali tradizionali** ad alta intensità energetica come il cemento e l'acciaio.

86 Akinade, O. O., et al. (2017). "Design for Deconstruction Using BIM Tool." *Buildings*, 7(4), 95.

87 Kendall, S., & Teicher, J. (2000). *Residential Open Building*. E&FN Spon

Sebbene il legno ingegnerizzato non sia un materiale puramente naturale, presenta un'origine rinnovabile, leggero e propenso alla lavorazione e ciò lo rende predisposto a cicli di vita circolari, rigenerativi e multipli, in linea con la logica delle 10 R. Per questi motivi si inserisce all'interno del **ciclo tecnico biologico** proposto dalla Ellen MacArthur foundation, costituendo una risorsa "*vivente*" che può essere **coltivata, trasformata, riutilizzata** e poi **restituita** alla biosfera senza generare rifiuti pesanti, questo a patto che per la realizzazione di elementi in legno ingegnerizzato vengano usate collanti che non hanno impatti significativi.⁸⁸ A differenza dei materiali da costruzione tradizionali, che derivano da processi estrattivi lineari e altamente inquinanti, il legno può essere coltivato e gestito in maniera sostenibile grazie a **modelli di silvicoltura certificata** che garantiscono il rispetto del suolo e del ciclo dell'acqua.⁸⁹

All'interno di un progetto architettonico, l'utilizzo di legno ingegnerizzato permette una progettazione consapevole dal punto di vista dei materiali, orientata alla forma e alla logica costruttiva e rigenerativa del sistema. Il legno lamellare e il Cross Laminated Timber trovano una larga applicazione negli ultimi decenni, grazie alle prestazioni strutturali, stabilità dimensionale e compatibilità ambientale, oltre alla possibilità di essere utilizzati in **sistemi costruttivi Off-Site**.⁹⁰ Questi prodotti consentono di progettare edifici che possono essere prodotti in stabilimento e trasportati in sito con relativa facilità grazie al peso per poi essere **assemblati a secco**, con la possibilità quindi di essere poi **disassemblati** e i componenti **riutilizzati** o inseriti in **processi circolari**. La progettazione per la disassemblabilità trova nel legno ingegnerizzato un materiale che facilita i processi di manutenzione, adattabilità e riuso degli elementi costruttivi, l'industrializzazione un materiale che si presta a lavorazioni sottrattive e di taglio tramite macchinari CNC e che produce scarti che possono essere riammessi in cicli produttivi.⁹¹

88 Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy*.

89 FAO (2020). *Forests and Sustainable Cities*. United Nations Food and Agriculture Organization.

90 Smith, R. E. (2011). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. Wiley.

91 Starzyk A., Marchwiński J., Milosevic V. (2023). Circular Wood Construction in a Sustainable Built Environment: A Thematic Review of Gaps and Emerging Topics. *Sustainability*, 17(16), 7333.

Le politiche industriali individuano il legno come un materiale che permette una **filiera corta e territoriale**, riducendo l'impatto dei trasporti e favorendo l'economia locale. Questo è un aspetto rilevante per l'Europa e l'Italia in vista delle strategie per la decarbonizzazione del settore edilizio e per questa ragione, stanno promuovendo filiere verdi e regionali capaci di generare valore ambientale, economico e sociale. A livello europeo, tra queste politiche troviamo l'**UE Forest Strategy for 2030**, parte integrante del Green Deal, strategia che promuove la **gestione sostenibile delle foreste** e l'uso del legno nella costruzione.⁹² Il programma **EIT Climate-KIC** è un programma per la silvicoltura intelligente e promuove la gestione forestale sostenibile attraverso strumenti innovativi come il monitoraggio via geo-dati e lo **sviluppo di filiere del legno** per sostituire materiali fossili e insieme ad altri programmi come il **WoodPOP** che propone azioni concrete per armonizzare gli standard europei per la costruzione in legno, supportare la prefabbricazione e promuovere sistemi modulari e industrializzati.⁹³

Il legno è quindi un dispositivo ecologico, un dispositivo progettuale e costruttivo che permette di concepire il progetto architettonico secondo i principi di circolarità. La sua capacità di adattarsi a logiche modulari, reversibili e rigenerative lo rende uno strumento per la transizione verso la decarbonizzazione promosso a livello istituzionale. È proprio questo supporto delle istituzioni europee attraverso le politiche e strategie di sviluppo che permette uno sviluppo e un'affermazione di questi modelli costruttivi prefabbricati in legno ingegnerizzato.

⁹² European Commission, Directorate-General for Environment. (s.d.). New integrated tools help the building sector move to a circular economy. Environment Newsroom. < <https://ec.europa.eu/newsroom/env/items/731613/en> >

⁹³ European Wood Policy Platform (WoodPoP). (2024). A wood-based circular bioeconomy for a sustainable Europe: Green construction and innovative wood solutions (Policy Paper) < <https://woodpop.eu/resources/wood-policy-paper/> >

PARTE 2 /

POLITICHE, PROGRAMMI E APPLICAZIONI: CATALIZZATORI DELLA CIRCOLARITA' E DELL'INNOVAZIONE INDUSTRIALIZZATA NELL'ARCHITETTURA

Le politiche e i programmi comunitari hanno orientato la transizione verso la circolarità stimolando la realizzazione di progetti di architettura Off-Site che in differenti contesti nazionali, mostrano applicazioni eterogenee a seconda dei quadri normativi locali.

2.1 LE ISTITUZIONI INTERNAZIONALI NELLA COSTRUZIONE DEL QUADRO PER LA TRANSIZIONE CIRCOLARE



1973: un'autostrada olandese dopo l'aumento dei prezzi del carburante dovuti alla crisi petrolifera.

Il percorso verso un'economia circolare non nasce in un vuoto politico, è il risultato di **impegni istituzionali** a livello globale portato avanti da decenni. A partire dagli anni Settanta la consapevolezza degli effetti delle attività umane sull'ambiente si è sviluppata ed è cresciuta. L'aumento dei **disastri ecologici**, le crisi energetiche e gli effetti sul clima misero in evidenza come i modelli di sviluppo minavano l'equilibrio ambientale. Eventi come la **crisi petrolifera** del 1973 e quella del 1979, la scoperta del **buco dell'ozono** e **disastri ecologici** come quello di Seveso⁹⁴, dimostrarono la dipendenza dello **sviluppo industriale** dalle fonti fossili e il loro impatto sull'ambiente. Questa consapevolezza portò alla constatazione che per mitigare le ricadute di eventi sulla popolazione era necessaria la **cooperazione internazionale**. Una crescente sensibilità verso le **tematiche ambientali** da parte di istituzioni e popolazione e la mobilitazione scientifica e culturale portò la comunità internazionale a **costituire una visione** comune per uno **sviluppo sostenibile**.

Il primo momento cruciale fu la **Conferenza ONU sull'Ambiente di Stoccolma** del 1972, in cui ci si confrontò sulla necessità di porre le tematiche ambientali come priorità globale. Il dibattito riguardava la necessità di integrare la tutela ambientale nelle politiche di sviluppo. La **Dichiarazione di Stoccolma**, con la quale si sancisce il **diritto umano a un ambiente sano**, fu il risultato del dibattito che vedeva da una parte i Paesi industrializzati e dell'altro quelli in via di sviluppo. I primi consapevoli dei problemi di inquinamento, causati anche dal loro sviluppo nel passato, dall'altro lato i paesi in via di sviluppo temevano che le regole ambientali potessero limitare la loro crescita economica. Il risultato raggiunto è stata la base per la definizione di una **governance ambientale internazionale** e la per concretizzare i valori promossi, la conferenza, portò all'istituzione del **Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP)**, organismo destinato a coordinare le politiche ambientali internazionali.⁹⁵

⁹⁴ Il disastro di Seveso accadde nel 1976, una nube tossica di diossina si sprigionò da uno stabilimento chimico vicino a Milano. Diventò un caso di portata internazionale anche per la Direttiva Seveso emanata dall'UE che regola la sicurezza ambientale
⁹⁵ Ufficio Generale dello sviluppo territoriale ARE, Confederazione Svizzera, 2004.
 1972: Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente umano, Stoccolma.

Il crescente interesse internazionale nelle tematiche ambientali e sociali generato dalla Conferenza di Stoccolma, porta alla **Prima Conferenza delle Nazioni Unite sugli insediamenti umani** del 1976. Conosciuta come **Habitat I**, determinò il riconoscimento delle città e degli insediamenti umani come elementi centrali per lo sviluppo sostenibile, gettando le fondamenta per politiche urbane integrate con obiettivi ambientali e sociali. Il collegamento tra urbanizzazione e sostenibilità rappresentò un passaggio chiave nella definizione delle politiche globali che, ancora oggi, influenzano le strategie per la transizione ecologica del settore delle costruzioni.⁹⁶

A seguire, negli anni Ottanta, avvenne un ulteriore consolidamento del tema ambientale sul piano scientifico. Il rapporto Brundtland del 1987 introdusse la definizione di sviluppo sostenibile: *“uno sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri”*. Questo portò la questione dell'equilibrio tra la crescita economica e le ricadute ambientali e sociali, al centro del dibattito globale.⁹⁷ Sul piano scientifico, la creazione dell'**Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC** nel 1988,⁹⁸ con i suoi rapporti, divenne il punto di riferimento principale per i negoziati climatici internazionali. Il lavoro della comunità scientifica portato avanti con ricerche, misurazioni e sperimentazioni, dimostrò come il cambiamento climatico fosse un problema misurabile e quindi definibile, il cui impatto era quantificabile e poteva essere discusso nei negoziati internazionali.

Queste tappe risultano fondamentali per gli sviluppi futuri del quadro politico e scientifico che hanno portato oggi a sostenere il modello di sviluppo circolare. Il paradigma lineare, valutato come non sostenibile e di impatto in tutti i settori, è stato accantonato in favore di un paradigma lineare, che comporta una ridefinizione sistemica dei modelli di sviluppo. In questa prospettiva, risulta chiaro come anche il settore delle costruzioni risulti interessato dal cambiamento e che debba essere disposta a cambiare per potersi evolvere.

⁹⁶ United Nations, *Vancouver Declaration on Human Settlements*, 1976.
⁹⁷ <https://www.are.admin.ch/are/it/home/media-e-pubblicazioni/pubblicazioni/ sviluppo-sostenibile/brundtland-report.html>
⁹⁸ <https://www.ipcc.ch/activities/>

Fonte: <http://www.citeco.fr/10000-ans-histoire-economie/monde-contemporain/premier-choc-petrolier>

Nel 1992 furono compiuti altri due passi decisivi. La nascita della **Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici**, UNFCCC⁹⁹ a New York, con l'obiettivo di **stabilizzare le concentrazioni di gas serra** affinché gli ecosistemi potessero adattarsi in maniera naturale al cambiamento climatico garantendo allo stesso tempo continuità nello sviluppo economico. Il secondo passo è stato, in occasione del **Vertice della Terra a Rio**, la formalizzazione dell'approccio multilaterale che integrava ambiente, sviluppo urbano e tutela delle foreste e della biodiversità.¹⁰⁰ Inoltre, venne formalmente **adottata** la precedente **Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti Climatici**, firmata a New York, obbligando all'organizzazione di incontri annuali dei 160 Paesi firmatari (Conferenza delle Parti) per monitorare e controllare i progressi fatti. Oltre a questo atto, **venne anche adottata l'Agenda 21**, un manuale politico per lo sviluppo sostenibile e la protezione ambientale contenente la definizione di obiettivi.

La **Commissione Onu per lo Sviluppo Sostenibile**, nacque proprio dai concetti promossi dall'Agenda 21, con il ruolo di monitorare l'attuazione delle politiche ambientali nei paesi membri.¹⁰¹ L'agenda 21 stabilisce gli obiettivi per uno sviluppo sostenibile e la protezione ambientale che si aggiungono ai 27 diritti e obblighi che i Paesi firmatari hanno stabilito nella dichiarazione di Rio. Questa guida internazionale riconosce un approccio integrato tra diritto alla casa, sviluppo urbano e ambientale, riconoscendo il concetto di **ambiente urbano sostenibile**, ripreso nel 2015 dall'**Agenda 2030**.

In occasione della 70^{esima} Assemblea Generale delle Nazioni Unite è stata approvata l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile. Documento programmatico che ha raccolto l'eredità dei vertici globali ridefinendo le linee guida dello sviluppo globale per i successivi quindici anni. Il documento si articola in diciassette obiettivi per lo sviluppo sostenibile, chiamati SDGs, e di 169 target per raggiungerli, rappresentando una visione integrata dello sviluppo prendendo in considerazione ambiente, società ed economia. La concezione di sostenibilità viene definita come un principio guida per tutte le politiche, private e pubbliche.¹⁰²



Vertice della Terra a Rio, 1992.

Gli eventi appena descritti sono stati i fondamenti per l'adozione dell'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile (2015, che venne sottoscritta da 193 Paesi, e che definì 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs) e 169 traguardi, tutti con l'intento di bilanciare dimensioni ambientali, sociali ed economiche.¹⁰³ I temi che riguardano questi obiettivi sono:

- Sconfiggere la povertà e la fame;
- Garantire salute, benessere, istruzione;
- Offrire acqua pulita e servizi igienico-sanitari;
- Produrre energia pulita e accessibile;
- Assicurare lavoro, crescita economica e innovazione;
- Ridurre le disuguaglianze;
- Assicurare città e comunità sostenibili;
- Consumo e produzione responsabili;
- Lotta contro il cambiamento climatico;
- Proteggere la pace, la giustizia;
- Istituzioni solide.



Obiettivi per lo sviluppo sostenibile. Agenda 2030.

Fonte: United Nations, Dipartimento degli Affari Economici e Sociali.

99 <https://climate-adapt.eea.europa.eu/it/metadata/organisations/united-nations-framework-convention-on-climate-change-unfccc>

100 Ufficio federale dello sviluppo territoriale ARE. (s.d.). 1992: Conferenza delle Nazioni Unite su ambiente e sviluppo, Vertice della Terra di Rio de Janeiro. In ONU

101 https://www.aren.admin.ch/aren/it/home/sviluppo-sostenibile/politica-sostenibilita/agenda2030/onu_-le-pietre-miliari-dello-sviluppo-sostenibile.html

102 <https://sdgs.un.org/2030agenda>

103 <https://asvis.it/goal-e-target-obiettivi-e-traguardi-per-il-2030/>

I 17 SDGs costituiscono il quadro di riferimento per la trasformazione ecologica e sociale. Il settore delle costruzioni riveste un ruolo strategico e trasversale nell'attuazione di molti di questi obiettivi in quanto, molti di essi, riguardano l'ambiente costruito. Per raggiungere questi obiettivi, il settore delle costruzioni è chiamato a compiere delle scelte per quanto riguarda l'utilizzo delle risorse naturali, il consumo energetico, la qualità della vita urbana e la giustizia sociale. Tra i 17 SDGs, l'obiettivo 11, **rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, resilienti e sostenibili**, si promuove un approccio integrato alla pianificazione e alla gestione del territorio. Per fare questo viene incoraggiato l'uso efficiente delle risorse, la rigenerazione urbana, l'accessibilità abitativa e il potenziamento delle infrastrutture resilienti. L'obiettivo 9, **costruire un'infrastruttura resiliente e promuovere l'innovazione ed una industrializzazione equa, responsabile e sostenibile**, è centrale nel cambiamento in atto verso un'evoluzione dell'edilizia verso modelli industrializzati, modulari e digitalizzati, in linea con l'architettura Off-Site. Viene chiesto quindi al settore delle costruzioni di essere un motore di innovazione tecnica, sociale, ambientale ed economica. L'Agenda 2030 incoraggia una visione progettuale integrata, dove l'architettura è parte di un processo circolare, collaborativo e orientato alla generazione di valore condiviso.¹⁰⁴

Nel quadro appena delineato, l'Unione Europea ha assunto un ruolo di primo piano, prendendo l'impegno di tradurre gli impegni globali in politiche concrete e strategie legislative. Il percorso è stato lungo, con gli inizi già dagli anni Settanta, attraverso la sollecitazione dell'elaborazione di un **Programma di Azione Ambientale**, 1973 e 1987,¹⁰⁵ e con l'Atto Unico Europeo¹⁰⁶ per inserire la tutela negli obiettivi comunitari.

Ad oggi, tutte queste normative hanno un obiettivo comune, fissato già dal Green Deal Europeo nel 2019: raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, e ridurre le emissioni di gas serra di almeno il 55% entro il 2030,¹⁰⁷ in linea con l'accordo di Parigi del 2015.

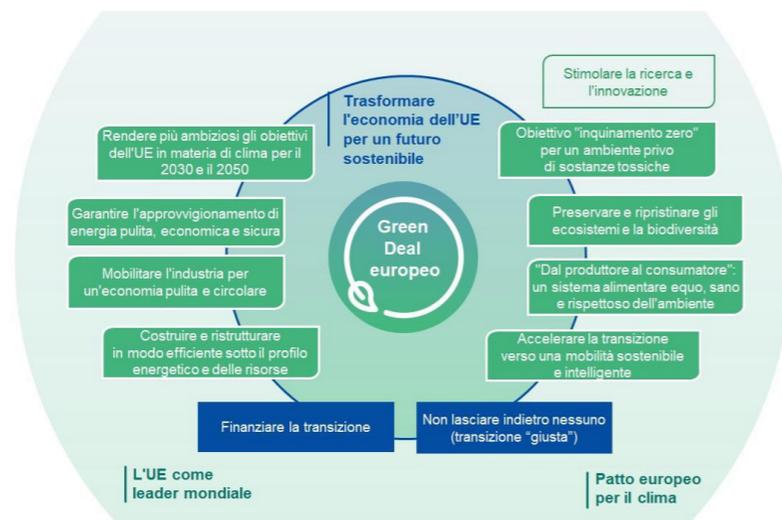
104 <https://arch.bz.it/ordine/agenda2023/>

105 Unione Europea. (s.d.). Accordo di Parigi. EUR-Lex. < [106 Unione Europea. \(s.d.\). L'Atto unico europeo. EUR-Lex. < \[>\]\(https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/summary/the-single-european-act.html\)](https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/glossary/paris-agreement.html#:~:text=L'accordo%20di%20Parigi%20costituisce,a%201%2C5%20%C2%B0C.> ></p></div><div data-bbox=)

107 Parlamento europeo. Politica ambientale: principi generali e quadro di riferimento. < [>](https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/71/politica-ambientale-principi-general-e-quadro-di-riferimento)

2.2 DALLA CORNICE STRATEGICA INTERNAZIONALE ALL'AZIONE EUROPEA E LE STRATEGIE OPERATIVE

Le iniziative a livello europeo in ambito ambientale, edilizio ed urbano si inseriscono in una gerarchia normativa che parte da accordi globali, passa attraverso le **strategie comunitarie** e si articola in **direttive e programmi quadro**, concretizzandosi con progetti specifici. Gli obiettivi a lungo termine per la sostenibilità e la neutralità climatica sono attribuibili agli accordi globali promossi dalle Nazioni Unite come l'Agenda 2030 e le Conferenze delle Parti. Questi obiettivi vengono recepiti a livello europeo attraverso strategie di ampia portata come il **Green Deal Europeo, l'Agenda Climatica e l'Agenda Digitale UE**, che determinano il quadro politico per le successive direttive.¹⁰⁸ Considerando che l'ambiente costruito è responsabile di circa il 36% delle emissioni di CO₂ e del 40% del consumo energetico dell'Unione Europea¹⁰⁹, la **decarbonizzazione dell'edilizia** risulta cruciale. L'**architettura Off-site** si inserisce in questo quadro come una **strategia incentivata** dalle normative in quanto permette la **riduzione delle emissioni** incorporate grazie all'uso di **materiali bio-based** e localizzati, il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici e l'ottimizzazione di processi produttivi per contenere gli sprechi e limitare le emissioni prodotte per la produzione dei componenti.¹¹⁰



Obiettivi e priorità del Green Deal europeo.

Fonte: Commissione europea, *Il Green Deal europeo, 2019*.

108 European Commission (2020). A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives. COM(2020) 662 final. < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0662> >
 109 European Commission, Joint Research Centre. *Buildings*. < https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/energy-efficiency/buildings_en >
 110 Pomponi, F., & Moncaster, A. (2016). Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment – What does the evidence say? *Journal of Environmental Management*, 181, 687–700.

Il **Green Deal Europeo** del 2019 ha assunto il ruolo di quadro strategico che definisce l'**obiettivo principale** dell'Unione Europea, la **neutralità climatica entro il 2050**, riducendo le emissioni nette di gas serra del 55% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2030 e traccia le priorità trasversali per settori come energia, edilizia, industria e trasporti.¹¹¹ In funzione di questo obiettivo si sono sviluppate le strategie, gli strumenti settoriali e i programmi operativi che hanno il ruolo di definire le azioni concrete per raggiungere tale obiettivo.

Nel 2020 viene introdotto il **Circular Economy Action Plan, CEAP**, con il ruolo di concretizzare un **approccio circolare** relativo ai materiali e indica gli interventi specifici per settori ad alta intensità di risorse, come l'edilizia, in modo da incentivare una transizione verso un'economia circolare.¹¹² L'architettura Off-Site si distingue per la possibilità di **progettare in ottica di assemblaggio e disassemblaggio** grazie alle metodologie DfD e DfMA, favorendo la durabilità, la manutenzione e il riuso dei componenti. Questa propensione è in linea con il CEAP che considera il settore delle costruzioni una delle priorità per l'implementazione di filiere sostenibili e circolari.¹¹³

Nel 2020 viene deliberata la **Renovation wave**, una misura riguardante il **patrimonio edilizio europeo**, caratterizzato da un'alta età media e quindi **poco performante**. Questa misura si pone come obiettivo quello di **raddoppiare i tassi di ristrutturazione**, rinnovare gli edifici meno performanti entro il 2030 e garantire che gli edifici di nuova realizzazione siano a emissioni zero. Per realizzare questo ambizioso obiettivo, si promuove l'**utilizzo di strategie** come i **Modern Methods of Construction** e l'**architettura Off-Site** per ridurre tempi, impatto e costi.¹¹⁴ Interventi di **retrofit modulare** rappresentano l'applicazione delle strategie Off-Site come strumento abilitante per il raggiungimento degli obiettivi del programma. Questi interventi sul costruito hanno il vantaggio di essere rapidi, non invasivi e replicabili su larga scala, con la possibilità di non dover trasferire coloro che ci abitano, in caso contrario, le strategie Off-Site permettono

111 European Commission (2019). The European Green Deal. COM(2019) 640 final. < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52019DC0640> >

112 Unione Europea. (2020, marzo). Piano d'azione per l'economia circolare. Commissione Europea. < https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en >

113 European Commission (2020). Circular Economy Action Plan – For a cleaner and more competitive Europe. COM(2020) 98 final. < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0098> >

114 https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/renovation-wave_en

di realizzare rapidamente soluzioni in cui gli abitati possano vivere temporaneamente.

Nel 2020 viene anche varato un importante strumento finanziario per la ripresa, **NextGenerationUE**, che mette in campo risorse rilevanti per attuazione delle strategie di transizione verde e digitale al fine di favorire la ripresa post pandemia. Il suo ruolo consiste nel fornire finanziamenti immediati e **vincolati a riforme e investimenti** coerenti con gli obiettivi del Green Deal, inclusi progetti per il rinnovamento energetico e industrializzazione della produzione nel settore edilizio.¹¹⁵ Nel 2021 viene emanato un pacchetto legislativo, **Fit for 55**, che rende vincolanti molti obiettivi che erano stati prefissati per il 2030, creando obblighi normativi che impongono la decarbonizzazione e incentivano interventi su materiali e processi delle costruzioni.

Nel 2021 con un orizzonte fino al 2027, nasce **l'Horizon Europe**, programma quadro per la ricerca e l'innovazione che finanzia ricerca applicata e progetti dimostrativi su tecnologie sostenibili. Rientrano in questa definizione i Modern Methods of Construction, le metodologie DfD e DfMA, i material passport e le strategie Off-site. Questo programma ha reso possibili progetti di ricerca relativi a tecnologie innovative, soluzioni industriali e progetti replicabili all'interno del settore delle costruzioni.¹¹⁶

Tra il 2020 e il 2021 è nata l'iniziativa trasversale **New European Bauhaus**, NEB, di natura culturale e progettuale che collega obiettivi climatici, qualità estetica e inclusione sociale. Il suo lavoro è quello di favorire lo sviluppo di progetti dimostrativi e di co-design per rendere le soluzioni tecniche più accettabili e appetibili a livello urbano.¹¹⁷ Il NEB mira ad unire estetica ed inclusione in una nuova visione dell'ambiente costruito, in tal senso, l'architettura Off-site si presta a questa visione grazie alla personalizzazione di massa, la possibilità di utilizzare materiali provenienti da modelli circolari e poter supportare progetti eterogenei. L'utilizzo di materiali di origine naturale, come i componenti in legno ingegnerizzato permettono la rigenerazione urbana attraverso soluzioni leggere, smontabili e reversibili.¹¹⁸

¹¹⁵ https://next-generation-eu.europa.eu/index_en

¹¹⁶ https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en

¹¹⁷ https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en

¹¹⁸ European Commission (2021). New European Bauhaus – Concept Paper. <
https://new-european-bauhaus.europa.eu/system/files/2021-07/2021-06-30_New_European_Bauhaus_Concept_Paper_HLRT_FINAL.pdf>

Nel campo della ricerca e dell'innovazione promossa dai progetti Horizon 2020 e Horizon Europe, i finanziamenti hanno permesso lo sviluppo di progetti sperimentali come:

- **WoodCircles**, il progetto promuove l'uso circolare del legno nella bio economia
- **REUSE**, la ricerca è stata funzionale allo sviluppo di pannelli strutturali in legno riutilizzabili
- **4RinEU**, che propone pacchetti prefabbricati per la riqualificazione energetica degli edifici.
- **Build-in-wood**, progetto che incentiva la costruzione in legno su larga scala
- **DRASTIC**, il quale si propone di trasformare l'ambiente costruito europeo rendendolo circolare e sostenibile dal punto di vista climatico.
- **GROPYUS**, consiste in un modello industrializzato di abitazioni sostenibili e digitali.

Questi progetti testimoniano come gli obiettivi prefissati dall'Unione europea siano perseguibili attraverso strategie alla cui base vi è un modello di sviluppo circolare e che le strategie legate ai Modern Methods of construction siano attuabili come mezzo per attuare i principi di circolarità. I programmi europei a sostegno di progetti di ricerca sono molti e di differente natura, durante il mio percorso accademico ho avuto la possibilità di partecipare come studente collaboratore alla ricerca, **al programma UROP nel progetto di ricerca "Circular Design Polito Lab"**. Il progetto Circular Design Polito Lab e gli altri progetti di ricerca, seppur con finalità e metodologie differenti, dimostrano come la piena attuazione dei principi dell'economia circolare nel settore delle costruzioni non si realizza unicamente attraverso dichiarazioni teoriche, ma richiede l'applicazione dei principi in strategie progettuali, costruttive e gestionali in grado di trasformare l'intero ciclo di vita dell'edificio. In tal senso, l'architettura Off-site offre supporto nelle sperimentazioni di modelli innovativi e capaci di coniugare modularità, sostenibilità e circolarità. Di seguito si presentano alcuni casi studio emblematici, selezionati per la loro capacità di integrare i principi della circolarità attraverso materiali rinnovabili, processi prefabbricati e strategie DfD e DfMA in un quadro coerente.

Il progetto **The Circular Retrofit Lab** realizzato in belgio è uno degli esempi più significativi a livello europeo. Sviluppato dal laboratorio di ricerca VUB (Vrije Universiteit Brussel) nell'ambito del progetto europeo BAMB (Buildings As Material Banks), tratta del **riuso modulare e prefabbricato** di una struttura esistente. Ogni componente è stato progettato secondo principi di **design for disassembly, tracciabilità e adattabilità futura**¹¹⁹. Il progetto adotta una struttura lignea a secco, completamente smontabile, con componenti standardizzati e materiali reversibili. Ogni elemento edilizio è stato dotato di un **material passport digitale**, che ne registra origine, composizione, durata e possibilità di riutilizzo. Questo approccio consente non solo una gestione più efficiente del ciclo di vita, ma anche una valorizzazione economica e funzionale dei materiali nel tempo.¹²⁰ Questo progetto è frutto quindi del programma europeo **BAMB**, il quale si pone l'obiettivo di **ridurre i rifiuti** dovuti alla costruzione attraverso la promozione dei valori dell'economia circolare. Per facilitare il riutilizzo e la valorizzazione dei materiali all'interno degli edifici, ha sviluppato una guida per i professionisti che permette, con l'utilizzo di material passport, di sviluppare nuovi modelli di business e approcci di progettazione che garantiscono la conservazione del valore dei materiali nel tempo.¹²¹



1. Le case degli studenti nello stato originale.



2. La struttura spogliata



3. L'aggiunta dei pannelli modulari della facciata.



4. Aggiunta di listelli di legno per la finitura della facciata



5. Fissaggio della finitura della facciata



6. Il Circular Retrofot Lab nella fase finale di costruzione.

119 Debacker, W., Manshoven, S. (2016). *Circular Retrofit Lab: Design for Change and Circularity*. VUB & BAMB Project.

120 <https://www.bamb2020.eu/topics/pilot-cases-in-bamb/retrofit-lab/>

121 <https://www.bamb2020.eu/topics/blueprint/>

Fonte immagini:
KADER studio, <https://www.circularactions.be/crl>

Upcycle House è un progetto sperimentale, con differenti finalità, volto a dimostrare le potenziali riduzioni delle emissioni di carbonio “attraverso l'utilizzo di materiali edili riciclati e upcycled”.¹²² Il progetto è stato sviluppato in collaborazione tra lo studio di architettura danese Lendager Arkitekter e la fondazione danese Realdania Byg con l'obiettivo di **creare un'abitazione sostenibile** utilizzando esclusivamente materiali riciclati. Il progetto fa parte di un programma di sviluppo sviluppato dalla fondazione Realdania Byg dal nome **MiniCO2 Housing** con il fine di dimostrare come sia possibile ridurre le emissioni di carbonio del 45% nella costruzione di case prefabbricate.¹²³ Nel caso di Upcycle House, la riduzione è stata dell'86% rispetto a una casa di riferimento. L'upcycling è il processo di **conversione di materiali di scarto** o prodotti di scarto in nuovi materiali o prodotti di qualità superiore, con conseguente **riduzione della produzione** e quindi delle emissioni di CO2. La casa è costruita con materiali riciclati lavorati e Upcycle House studia quanto sia effettivamente possibile ridurre l'impronta di CO2 utilizzando il più possibile materiali riciclati. La struttura portante è costituita da due **container prefabbricati**, mentre il tetto e il rivestimento della facciata sono realizzati con **lattine di alluminio riciclato**. I pannelli della facciata sono realizzati in carta granulata riciclata post-consumo, pressata e trattata termicamente. Il pavimento della cucina è rivestito con piastrelle di scarto di sughero di champagne, mentre le piastrelle del bagno sono in vetro riciclato. Pareti e pavimenti sono rivestiti con pannelli OSB composti da trucioli di legno, sottoprodotti di vari siti produttivi, pressati insieme senza colla.¹²⁴



Fonte immagini:
KADER studio, <https://lendager.com/project/upcycle-house/>

¹²² <https://www.realdaniabygbyg.org/projects/the-minico2-houses-the-upcycle-house>

¹²³ <https://www.realdaniabygbyg.org/projects/the-minico2-houses>

¹²⁴ <https://www.archdaily.com/458245/upcycle-house-lendager-arkitekter>



Realizzazione delle divisioni interne



Le componenti utilizzate provengono da processi circolari e sono state assemblate a secco



I container riutilizzati sono stati rivestiti da una struttura che incrementa gli spazi interni.

Questi esempi dimostrano che l'integrazione tra i principi dell'economia circolare e il progetto di architettura sia già realtà e non si limita al recupero dei materiali, ma implica una **riconfigurazione sistematica del progetto** come processo aperto, basato su logiche di sistema, ciclicità e adattabilità. Le strategie Off-site, grazie all'applicazione di processi innovativi, dimostrano che queste architetture sono già tecnicamente realizzabili e consentono di concepire un'architettura come una **piattaforma rigenerativa**, in grado di evolvere nel tempo, ridurre il suo impatto e conservare valore. Tuttavia, affinché questi modelli diventino replicabili e diffusi, è necessario **superare barriere normative, culturali e produttive** che ancora oggi ostacolano la transizione circolare nel settore dell'architettura. La trasferibilità di questi modelli virtuosi da un contesto di ricerca e architetture sperimentali è fortemente influenzata da fattori locali come gli assetti normativi, gli incentivi pubblici, la capacità industriale, la cultura progettuale, la struttura della filiera e la maturità del mercato. In Italia, il percorso verso l'adozione di modelli costruttivi che si basino sui principi dell'economia circolare si scontra con barriere strutturali e operative che ne rallentano l'affermazione.

Il primo ostacolo riguarda la mancanza di una visione normativa integrata. Nonostante esistano strategie nazionali come il **Piano d'Azione per l'Economia Circolare** e le direttive europee, nel settore edilizio i riferimenti normativi relativi al tema risultano frammentari e disomogenei.¹²⁵ Le **normative urbanistiche, edilizie ed ambientali raramente promuovono il riuso dei materiali o il design for disassembly**, e la classificazione dei rifiuti a livello normativo crea non poche barriere per l'utilizzo di materiali riutilizzabili secondo i principi di circolarità¹²⁶. Si può definire che il sistema normativo italiano sia, per quanto riguarda questi temi, **rigido e conservativo**, propenso ad incentivare la conformità a pratiche consolidate anziché l'innovazione progettuale e costruttiva.

¹²⁵ EconomiaCircolare.com. (2025, aprile 25). Confindustria: secondo report economia circolare driver competitivo. < <https://economiecircolare.com/confindustria-secondo-report-economia-circolare-driver-competitivo/> >

¹²⁶ Testa, C. (2023, 4 luglio). Rifiuti. Il sottoprodotto tra disciplina probatoria e l'esigenza di un cambio di prospettiva. Lexambiente. < <https://lexambiente.it/index.php/materie/rifiuti/dottrina/179/rifiuti-il-sottoprodotto-tra-disciplina-probatoria-e-l-esigenza-di-un-cambio-di-prospettiva> >

Un ulteriore limite è rappresentato dalla **struttura produttiva del comparto edilizio italiano**, dominato da piccole e microimprese con bassa capacità di investimento in tecnologie digitali, automazione e innovazione di processo.¹²⁷ Questa configurazione rende difficile l'adozione di modelli industrializzati che richiedono **capitali iniziali rilevanti**, una rete di sostegno composta da un coordinamento tra filiera produttiva e normative. A questo si aggiunge una diffusa carenza di **competenze trasversali** tra progettazione produzione e logistica, che ostacola l'integrazione tra economia circolare e sistemi prefabbricati.

Dal punto di vista della gestione del fine vita degli edifici, in Italia mancano ancora le **infrastrutture e i mercati secondari** per il recupero e la **valorizzazione dei materiali edilizi**, soprattutto se non si tratta di metallo o calcestruzzo. I materiali compositi, gli impianti e le finiture sono raramente progettati per essere recuperati, e nei cantieri gli operatori non sono dotati di **strumenti per il loro disassemblaggio**. Questo limita la possibilità di attuare strategie circolari post-uso, riducendo il valore ambientale dei materiali e incrementando i costi di demolizione e smaltimento.¹²⁸ Nei casi in cui si voglia sopperire a questa mancanza e avviare un processo di decostruzione o di demolizione selettiva, l'assenza di strumenti di valutazione e monitoraggio condivisi, che rendano misurabili le prestazioni circolari degli edifici mancano. In altri contesti si stanno diffondendo strumenti come i **Material Passport, i Building Circularity Indicators o i Life Cycle Assessment** integrati in software per la progettazione e questo facilita l'applicazione e la diffusione di strategie di circolarità. Si può quindi affermare che la transizione verso un'architettura circolare in Italia sia vincolata ad un intervento coordinato su più livelli: **semplificazione normativa, formazione tecnica e culturale, investimenti in filiere produttive sostenibili, supporto all'innovazione digitale e definizione di strumenti di valutazione condivisi**. Solamente un supporto di questo tipo renderebbe la transizione sistemica verso i principi di circolarità attuabile, rendendo sperimentazioni approcci progettuali diffusi, capaci di rigenerare il costruito e il modo stesso in cui i professionisti si avvicinano ai temi dell'architettura circolare.

¹²⁷ Cresme (2022). Il settore delle costruzioni in Italia: dati strutturali e tendenze.

¹²⁸ Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). "Circular Economy for the Built Environment: A Research Framework." *Journal of Cleaner Production*, 143, 710–718.

2.3 APPLICAZIONI DEI PRINCIPI DI CIRCOLARITA' E DI STRATEGIE OFF-SITE IN DIFFERENTI CONTESTI EUROPEI

Il contributo delle politiche europee è stato fondamentale per il sostegno verso l'applicazione dei principi di circolarità, di decarbonizzazione e di innovazione. Questo indirizzo dei modelli di sviluppo porta all'applicazione di questi principi in contesti europei differenti tra loro, con finalità simili ma raggiunte con l'applicazione delle strategie e delle metodologie con motivazioni differenti. Durante il corso di *Progetto di Architettura Off-Site* del professore Guido Callegari ho avuto modo di analizzare gli ambiti di applicazione dell'architettura Off-Site. In linea con le sfide attuali, durante il corso, sono stati individuati gli ambiti applicativi che hanno visto l'affermazione degli approcci Off-Site come naturale declinazione delle esigenze in strategie concrete:

- L'emergenza abitativa,
- Le residenze universitarie,
- Gli edifici temporanei per il trasferimento degli utenti,
- Retrofit e densificazione del costruito,
- Edifici temporanei di natura commerciale,
- Edifici temporanei adattabili ai cambiamenti climatici,
- Edifici modulari temporanei per l'edilizia scolastica.

Questi possono essere iniziative di natura pubblica o privata ma quello che permette di sviluppare progetti innovativi in cui gli attori condividono la volontà di applicare le strategie Off-Site, sono le normative. Analizzare e investigare tutti questi ambiti in questo elaborato di tesi risulta complesso e dispersivo, per questa ragione la mia attenzione si è focalizzata sui progetti che affrontano le sfide relative all'emergenza abitativa.

L'Unione Europea nel 2017, attraverso l'introduzione del **Pilastro Europeo dei Diritti Sociali**, si fa portatrice di garantire a tutti i cittadini dei Paesi europei l'**accesso all'abitare**. L'obiettivo è garantire che queste **soluzioni abitative** possano essere **di qualità, accessibili economicamente ed efficienti** dal punto di vista energetico per combattere la povertà energetica.¹²⁹ Questo impegno è stato preso in quanto, negli ultimi anni, è emersa la problematica legata all'abitare dovuta a fattori come l'**aumento della popolazione**, la **crescita dell'urbanizzazione** e l'**instabilità economica**. Questi fattori hanno portato una crescente quota dei nuclei familiari a fare difficoltà ad accedere ad una soluzione abitativa che garantisca le **condizioni minime** per il benessere. L'aumento dei prezzi degli immobili, dovuto a fenomeni come l'overtourism, la disponibilità limitata di appartamenti e una diminuzione della capacità economica della popolazione sono i fattori che hanno peggiorato una situazione abitativa precaria in molti contesti, in particolar modo nelle grandi città.

L'emergenza abitativa è un fenomeno complesso e nel 2019, il rapporto *"The State of Housing in the EU"* ha descritto il problema attraverso la rappresentazione della situazione europea con l'utilizzo di dati che evidenziano come l'11% delle famiglie a basso reddito ha speso più del 40% delle proprie entrate in **costi dovuti all'abitare** e considerando anche i nuclei familiari a rischio povertà, la percentuale di coloro che supportano queste spese sale al 37,8% dei nuclei familiari europei. I nuclei familiari a rischio povertà descritti nel rapporto rappresentano 156 milioni di persone in Europa.¹³⁰

Risulta necessario comprendere l'andamento del fenomeno e aggiornare periodicamente l'andamento di questa emergenza e il CESE, **Comitato Economico e Sociale Europeo**, che ha il ruolo di monitorare e analizzare questa situazione, ha stabilito che la crisi ha assunto dimensioni maggiori, provocando effetti collaterali sull'intera popolazione e per questa ragione, nel Febbraio 2025 ha stabilito che sono necessari 270 miliardi di euro all'anno destinati agli investimenti per alloggi sociali e a prezzi accessibili per avere un reale impatto sull'emergenza.¹³¹

129 Comitato Economico e Sociale Europeo. (2020, 16 settembre). Parere dell'CESE — Accesso universale a un alloggio dignitoso, sostenibile ed economicamente accessibile sul lungo periodo. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea. < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020IE1076> >

130 <https://www.housingeurope.eu/the-state-of-housing-in-the-eu-2019/>

131 <https://cor.europa.eu/it/notizie/crisi-abitativa-i-fondi-ue-sostengano-la-costruzione-di-nuovi-alloggi-sociali-non-solo-le>

Tra le principali risposte europee all'emergenza abitativa, si possono individuare tre modelli: **social housing**, **affordable housing** e **cooperative abitative**. Ognuno di questi si distingue per la tipologia di cittadino a cui fa riferimento e per la modalità di accesso. Il **Social housing** è tradizionalmente associato all'edilizia residenziale pubblica o gestita da enti no-profit. Questa tipologia ha l'obiettivo di offrire **abitazioni a costi calmierati** a coloro che non possono accedere al mercato libero. **L'affordable housing** include invece una gamma più ampia di soluzioni, che possono essere di iniziativa privata o in formule miste, non sempre legate al no-profit. L'obiettivo rimane quello di contenere i prezzi per un pubblico più vasto. Infine, le **cooperative abitative** rappresentano un modello di gestione partecipata, basato sulla proprietà collettiva. I membri della cooperativa accedono a un'abitazione mediante affitto o acquisto, partecipando attivamente alla gestione dell'immobile e delle attività comuni.

L'Unione Europea non ha autorità diretta sulle politiche abitative, in quanto, l'edilizia abitativa rimane una competenza nazionale. L'UE ha la possibilità però di **influenzare l'edilizia abitativa** attraverso iniziative che incidono su condizioni quali sussidi statali, leggi fiscali e regolamentazione della concorrenza. A livello europeo viene promossa un' **edilizia abitativa accessibile** e **sostenibile** tramite strumenti non vincolanti come raccomandazioni, linee guida e iniziative, un esempio è il Pilastro europeo dei diritti sociali. Il **CESE**, Comitato Economico e Sociale Europeo, ha esortato l'UE ad adottare una strategia che comprenda una serie completa di **misure per aiutare gli Stati membri** ad incrementare in modo sostenibile l'offerta di alloggi sociali e accessibili e a combattere efficacemente il problema¹³². Per raggiungere questi obiettivi, il Comitato suggerisce all'UE di sancire in modo unilaterale il **diritto universale all'abitare** e di tracciare l'andamento dei risultati in merito all'edilizia abitativa attraverso vertici annuali. Risulta strettamente necessario creare anche un fondo europeo per gli investimenti in alloggi accessibili, dignitosi e idonei, finalizzato a creare e mantenere alloggi a basso costo.

¹³² Unione Europea. Comitato economico e sociale europeo (CESE). https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/search-all-eu-institutions-and-bodies/european-economic-and-social-committee-eesc_it

L'architettura Off-Site rappresenta una strategia che trova applicazione in progetti relativi all'emergenza abitativa. L'utilizzo di strategie di prefabbricazione, assemblaggio in cantiere di componenti, metodologie DfD e DfMA e le logiche circolari permettono di rispondere ad esigenze di queste tipologie di architetture. Queste tipologie di edifici hanno come aspetto principale **l'ottimizzazione delle risorse economiche e delle tempistiche**, oltre ad allinearsi con le disposizioni dell'UE per poter incorrere in finanziamenti europei. Le strategie Off-Site inoltre permettono di avere un **maggiore controllo sul processo costruttivo** e una più agile gestione del cantiere, aspetti che permettono di ridurre i rischi di imprevisti. Il cantiere, per logica Off-Site, diventa un luogo in cui a seconda dei componenti, è adibito all'assemblaggio e, in contesti urbani ad alta densità abitativa, la rapidità degli interventi e la riduzione dei macchinari presenti in cantiere rappresenta un vantaggio per la sicurezza.¹³³

In secondo luogo, l'ambiente di fabbrica garantisce una maggiore qualità e precisione dei componenti edilizi, riducendo significativamente il rischio di errori esecutivi o difetti costruttivi. Le tecniche di **progettazione digitale (BIM)** e la produzione assistita (CAD/CAM) permettono un controllo rigoroso su ogni fase, dal disegno alla posa in opera, assicurando elevati standard prestazionali. Un ulteriore vantaggio risiede nella **flessibilità progettuale offerta dai sistemi modulari**, che permettono di adattare i volumi abitativi alle esigenze specifiche degli utenti, comprese quelle legate all'accessibilità, alle dimensioni familiari e alla configurazione urbana.

Infine, l'approccio industrializzato permette una più accurata previsione dei costi, grazie al dettaglio progettuale richiesto e alla razionalizzazione dei processi di approvvigionamento. Questo rappresenta un fattore chiave nei progetti di edilizia sociale, dove il controllo della spesa pubblica è fondamentale per la replicabilità e la scalabilità degli interventi.

¹³³ Smith, R.E., Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction, Wiley, 2011.

Il peso dell'edilizia sociale nelle normative e nel patrimonio costruito di diverse realtà europee è ancora limitato. La **Spagna** è uno di questi ma con il crescere di **problematiche legate all'abitare**, soprattutto in città come Barcellona, ha portato ad una strutturazione maggiore di queste politiche e l'avvio di differenti progetti sociali. La città di Barcellona attualmente dispone del 3% di alloggi accessibili rispetto al totale del patrimonio costruito. Per questa ragione le istituzioni della Catalogna e della municipalità di Barcellona hanno avviato programmi per incentivare lo **sviluppo di nuove forme** per l'abitare sociale e la costruzione di soluzioni abitative a prezzi accessibili.¹³⁴ Per attuare questi programmi sono state applicati strumenti innovativi sotto il profilo urbano per le politiche abitative e dell'innovazione edilizia per la concretizzazione degli obiettivi.¹³⁵

Oltre alla quantità di soluzioni abitative a prezzi accessibili, un fattore rilevante per l'avvio delle politiche è stato l'overtourism e la speculazione immobiliare. Nel 2023 gli affitti hanno raggiunto i **17,4 €/m²**, prezzo che si stima sia al di sopra le possibilità economiche per molte famiglie.¹³⁶ Nel 2020, il Governo Catalano ha emanato la **Legge 11/2020** che stabilisce un tetto massimo agli affitti nelle abitazioni sociali pari a **7,82 €/m²**.¹³⁷ Con questo provvedimento è stato fatto un passo importante per garantire il diritto all'abitare. Per attuare in modo concreto questo provvedimento, il **Piano Urbanistico Metropolitano**, PGOU, impone che il **30%** delle nuove costruzioni o ristrutturazioni superiori a 600 m² siano destinati ad **edilizia a prezzi accessibili**. Ad ampliare questa disposizione troviamo la norma urbanistica finalizzata all'edilizia VPO, che riserva il 40% del suolo urbano a questo fine e il 20% per edilizia vincolata ad affitto sociale.



Manifestazione contro il turismo, Barcellona 2025

Fonte: <https://it.euronews.com/>

A livello nazionale spagnolo, queste norme rappresentano i pilastri per l'attuazione di un processo di incremento del patrimonio edilizio sociale.

A livello istituzionale, il **Consorci de l'Habitatge de Barcelona** (CHB), organismo congiunto tra Ajuntament e Generalitat de Catalunya, costituisce il nodo centrale per la **gestione delle politiche abitative**, in coordinamento con l'IMHAB (Institut Municipal de l'Habitatge i Rehabilitació de Barcelona). Accanto a questi, il Consell de la Vivienda Social, con funzioni consultive e di monitoraggio, assicura trasparenza e partecipazione nella definizione delle politiche pubbliche. In questo contesto si inserisce il lavoro dell'IMHAB (Institut Municipal de la Vivienda y Rehabilitación de Barcelona), l'ente municipale che **coordina e promuove** numerosi progetti pilota di edilizia sociale. Tra questi spiccano tre casi studio emblematici per l'uso innovativo di sistemi costruttivi off-site in legno e misti: APROP Ciutat Vella, La Borda e La Balma. Ognuno di questi progetti dimostra come la **combinazione di materiali sostenibili e tecniche di prefabbricazione** possa offrire una risposta concreta e replicabile alla crisi abitativa, introducendo nuovi modelli di convivenza, partecipazione e accessibilità¹³⁸.

134 Observatori Metropolità de l'Habitatge de Barcelona, Informe anual 2023. < <https://www.ohb.cat/en/project/housing-in-the-barcelona-metropolis-in-2023-affordability-and-access-annual-report/> >

135 Ajuntament de Barcelona, Pla pel Dret a l'Habitatge 2016–2025, 2020. < https://ajuntament.barcelona.cat/dretssocials/sites/default/files/arxiu-documents/pla_pel_dret_a_l_habitatge_part_1_analisi_i_diagnosi_fi.pdf >

136 Idealista, Preu del lloguer a Barcelona 2023. < <https://www.idealista.com/sala-de-prensa/informes-precio-vivienda/alquiler/cataluna/barcelona-provincia/barcelona/> >

137 Generalitat de Catalunya, Llei 11/2020 sobre contenció de rendes de lloguer, 2020. < <https://ivalua.cat/ca/revisions-devidencia/avaluabilitat-de-la-llei-de-contencio-dels-preus-del-lloguer-dhabitatges> >

138 IMHAB, Habitatge públic a Barcelona: reptes i innovacions, 2022. < https://ajuntament.barcelona.cat/economiatreball/sites/default/files/2025-05/08_Quaderns_210x297_IMHAB2024_CATAL%C3%80_Digital_compressed.pdf >

Il primo progetto, **APROP Ciutat Vella**, fa parte delle iniziative sviluppate in Spagna, in questo caso a Barcellona, attraverso il programma IMHAB promosso dal comune di Barcellona. Il progetto ha l'intento di **ricollocare temporaneamente nel proprio quartiere** i residenti che hanno subito uno sfratto. In questo progetto sono stati applicati i principi di circolarità **riutilizzando e trasformando i container marittimi**, e questo ha permesso di ridurre l'impronta ecologica dovuta alla produzione di materiali da costruzione, rimpiazzati da una struttura modulare composta dai container e supportata da una struttura in acciaio per l'attacco a terra, che ha permesso di evitare l'utilizzo del cemento armato. I progettisti hanno adottato un sistema costruttivo a secco composto dalla struttura metallica per l'attacco a terra e il fissaggio dei container e una struttura lignea completare l'edificio.

Questa soluzione costruttiva è stata scelta dai progettisti in quanto l'edificio **occupa il suolo per un periodo di tempo limitato** e il programma che ha sovvenzionato il progetto prevede che questo venga **disassemblato e trasportato** in un altro contesto. Il riutilizzo di componenti, la modularità dei container e il sistema di fondazioni prive di calcestruzzo hanno permesso di ridurre i costi ed ottenere un costo di costruzioni pari a **1958€** al metro quadro.¹³⁹



139 Shiel, A. APROP Ciutat Vella offers a strategic solution to gentrification in Barcelona. Archello. < <https://archello.com/news/aprop-ciutat-vella-offers-a-strategic-solution-to-gentrification-in-barcelona> >

Fonte immagini:

- <https://straddle3.net/en/proyectos/aprop-allotjaments-de-proximitat-a-ciutat-vella-barcelona>
- <https://archello.com/news/aprop-ciutat-vella-offers-a-strategic-solution-to-gentrification-in-barcelona>

PARTE 2



POLITICHE, PROGRAMMI E APPLICAZIONI



Dettaglio estetico dei moduli di facciata.



Dettaglio estetico dei moduli di facciata.



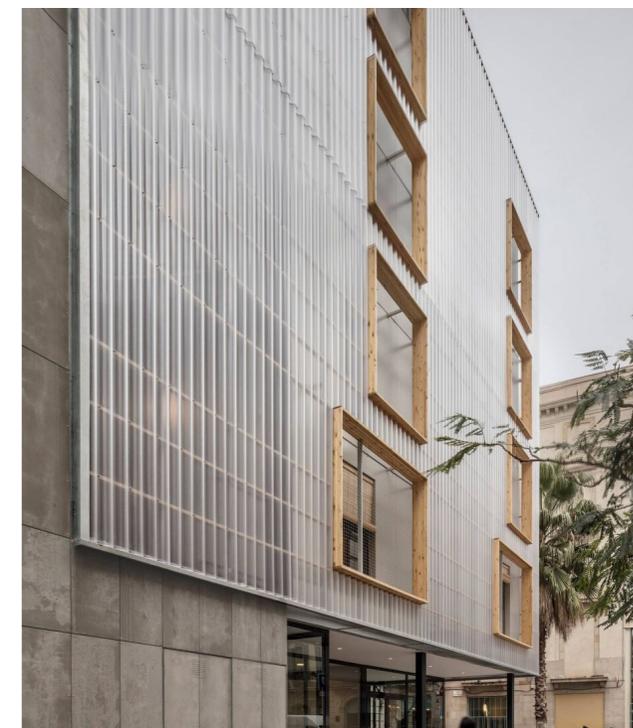
Posizionamento dei moduli di facciata in cantiere.

Il progetto si basa sul principio del riuso, della modularità e reversibilità. I container utilizzati sono stati progettati per essere smontati e riconfigurati con differenti soluzioni di assemblaggio. Questo approccio, improntato sulla necessità di un **edificio temporaneo, economico** e con moduli ricavati da container marittimi ha saputo conciliare questi aspetti con una attenzione progettuale estetica e di comfort per gli utenti. I dodici appartamenti, diversi per metrature, per rispondere ad **z**, presentano strategie per il benessere interno senza dover sfruttare sistemi impiantistici per la climatizzazione. Tutti gli alloggi presentano due affacci per garantire una **ventilazione incrociata**. La facciata Nord-Ovest dell'edificio presenta un vano tra la doppia pelle dell'edificio, che genera un nucleo di ventilazione verticale. Le facciate sono ventilare e grazie ad un'attenzione per quanto riguarda l'isolamento termico, è stato possibile migliorare l'efficienza energetica. La pelle esterna della facciata è stata realizzata con pannelli in policarbonato traslucido, il che permette di migliorare l'illuminazione interna durante il giorno e di illuminare gli spazi circostanti di notte senza dover utilizzare sistemi illuminanti aggiuntivi.

Le immagini di cantiere mostrano come l'intervento si basi su di una **struttura metallica modulare**, su cui sono stati assemblati i container, allestiti in stabilimento con serramenti e finiture interne. In sito, sono state completate le operazioni di installazione dell'isolamento termico e la seconda pelle realizzata con elementi lignei in LVL. Gli impianti sono stati **vengono preinstallati nella fase di fabbricazione** per semplificare l'assemblaggio dei moduli in cantiere.

Il progetto si dimostra una soluzione innovativa per rispondere all'emergenza abitativa in contesti urbani densi grazie ad aspetti innovativi come la temporaneità dell'intervento, la disassemblabilità e la possibilità di essere riconfigurato in altri contesti. L'aspetto però più interessante è la sua **scalabilità e replicabilità all'interno del tessuto urbano consolidato** grazie al sistema costruttivo del progetto basato sull'**accoppiare moduli tridimensionali realizzati con container standard, e quindi ripetibili, a una struttura legno lamellare per completare l'edificio**.

I materiali utilizzati e i sistemi costruttivi utilizzati per questo progetto lo rendono un caso studio rilevante per l'analisi di come i temi relativi all'economia circolare, la prefabbricazione, il DfD e i materiali lignei, possano essere racchiusi in una **soluzione architettonica capace di rispondere ad esigenze locali** con strategie che rispondono ai **modelli di sviluppo incentivati dall'UE**, rappresentando così un vettore di innovazione.



Lavorazioni in stabilimento dell'azienda Byldis.



Movimentazione e stoccaggio delle componenti di facciata.

Il progetto **La Borda** è il risultato di un'iniziativa privata ed è stato sviluppato dallo studio **Lacol** nel 2019 a Barcellona. Questo edificio è stato realizzato attraverso la partecipazione dei futuri residenti attraverso una **cooperativa edilizia** per accedere ad una soluzione abitativa dignitosa e non speculativa per combattere il costo elevato degli appartamenti nel mercato libero. Il progetto è fortemente influenzato dal sito su cui sorge, un lotto di terreno pubblico destinato all'edilizia popolare che è stato dato in **concessione per 75 anni**. Il progetto si propone di definire un programma di edilizia residenziale collettiva tra le 28 unità abitative con spazi condivisi per poter condividere spazi e spese di gestione. Gli spazi sono articolati attorno ad una corte lungo cui si sviluppano gli spazi distributivi.

Il progetto si pone come obiettivo quello di costruire questi spazi con il minor impatto ambientale per tutto il ciclo di vita dell'edificio e anche per quanto riguarda la sua vita operativa. La **povertà energetica** e il costo elevato per la climatizzazione degli spazi ha incentivato un progetto che permettesse di **ridurre i costi e i consumi agli utenti**. Per fare questo, le prestazioni dell'edificio e i materiali impiegati sono risultati fondamentali e i sistemi costruttivi in legno CLT hanno permesso di **ridurre i costi dovuti alle utenze** e l'impatto ambientale dell'edificio, oltre ad essere più leggero e quindi richiedere **fondazioni con dimensioni ridotte**, aspetto che ha permesso alla cooperativa di risparmiare in termini economici. Sono state incentivate strategie passive per diminuire la dipendenza da sistemi di climatizzazione.

L'attuazione di alcune di queste strategie necessitano della partecipazione degli utenti per ottimizzarle e la cooperazione e la condivisione degli spazi ha determinato che fosse previsto un dispositivo che in funzione dei consumi reali, provvedesse a realizzare report al fine di informare gli inquilini e portarli ad ottimizzare i loro consumi. La collaborazione tra gli inquilini è iniziata fin dalle prime fasi di progettazione, per stabilire le loro necessità, ed è continuata con l'autocostruzione di alcune parti dell'edificio per ridurre i costi.

Fonte immagini:

- <https://www.archdaily.com/922184/la-borda-lacol>

- <https://archello.com/it/project/la-borda-housing-cooperative>

PARTE 2



POLITICHE, PROGRAMMI E APPLICAZIONI



Dettaglio estetico dei moduli di facciata.



Posizionamento dei moduli di facciata in cantiere.

Il progetto è stato scelto in quanto l'approccio e l'attenzione riposta nelle scelte progettuali ed architettoniche ha portato i costi di costruzione ad essere di **841 €/m²**. Questo costo, se messo in relazione con edifici simili, per logica e finalità, risulta in linea solamente con progetti di dimensioni più importanti, in cui la scala dell'intervento ha reso possibile l'**applicazione di strategie costruttive** con gradi di industrializzazione molto più elevata o con soluzioni costruttive meno sostenibili.

Per ottenere questo risultato, sono risultati fondamentali meccanismi come l'**autocostruzione da parte degli abitanti** di determinate porzioni dell'edificio. Per fare questo è stata necessaria la **suddivisione in fasi della costruzione**. Nella prima fase consisteva nella realizzazione del minimo indispensabile per permettere alla cooperativa di avviare lavori di autocostruzione, anche in attesa dei fondi per garantire la fase successiva.

L'unione di queste persone in un'organizzazione ha permesso anche di stabilire un canone mensile concordato di **7 €/m²**, quasi la metà del prezzo medio per la città di Barcellona, e di collaborare con il collettivo Lacol per comprendere quali fossero le **esigenze energetiche degli abitanti**. Questo ha permesso di aumentare la consapevolezza collettiva sulla povertà energetica.

Le strategie bioclimatiche vedono al centro della loro consistenza la corte interna, fondamentale per le strategie passive che prevedono di catturare le radiazioni solari in inverno e favorire la ventilazione interna nella stagione estiva.

Il sistema edilizio prevede l'uso di **pannelli CLT** e componenti con un grado di prefabbricazione maggiore come il **blocco scale**. La struttura portante è interamente realizzata in legno lamellare incrociato prodotto in stabilimento, questo ha permesso di ridurre i **tempi di costruzione della struttura a 3 mesi**. Il caso studio risulta essere un'applicazione virtuosa delle strategie Off-Site, in quanto coniuga la riduzione dell'impatto ambientale con una qualità costruttiva elevata¹⁴⁰. L'edificio integra dal punto di vista tecnologico **soluzioni bioclimatiche passive** come la ventilazione naturale e un sistema costruttivo con **alte prestazioni** terminate date dall'involucro. L'uso del legno, come visto in precedenza, ha ridotto il peso strutturale e di conseguenza i costi delle fondazioni.

Il caso studio è stato scelto in quanto risulta applicazione pratica dell'unione tra *"l'industrializzazione e il carattere collaborativo del progetto, la quale ha permesso una maggiore personalizzazione e un incremento della rapidità e della qualità dell'abitare condiviso"*.¹⁴¹



Lavorazioni in stabilimento dell'azienda Byldis.



Movimentazione e stoccaggio delle componenti di facciata.

¹⁴⁰ <https://archello.com/it/project/la-borda-housing-cooperative>

¹⁴¹ <https://lacol.coop/cooperativa/>

La Balma è il progetto risultato vincitore di un concorso pubblico destinato a **cooperative di edilizia residenziale pubblica** per la città di Barcellona. Questo progetto sorge sul lotto comunale di calle Esproncea e risponde all'esigenza della municipalità di edifici residenziali accessibili. L'edificio è il risultato della collaborazione tra la cooperativa **La Boqueria** e lo **studio Lalcol**. L'edificio, realizzato nel 2021, è articolato in venti appartamenti destinati al reinserimento sociale per famiglie in difficoltà.

L'approccio progettuale si è orientato verso la **definizione di un modulo** di 16 m² che, attraverso la loro combinazione, possono generare soluzioni abitative di differenti metrature. La tipologia base offre una superficie di 50 m² e l'unione con uno o due moduli permette di incrementare la superficie. Al fine di garantire una flessibilità degli spazi, necessari per questo progetto, non è stato scelto un sistema a moduli 3D, bensì di **pannelli 2D in CLT**. La struttura lignea è stata accoppiata ad una struttura in blocchi di cemento e cemento armato che costituiscono l'attacco a terra e la definizione degli spazi al piano terra, destinati a funzioni non abitative. La scelta del **sistema costruttivo pannelli di CLT** è stata presa per garantire rapidità nella costruzione, una riduzione dei costi dovuta alla riduzione delle fondamenta garantita dalla leggerezza dei pannelli e un minore impatto ambientale. La scelta di utilizzare il cemento armato e blocchi di cemento per realizzare il piano terra è dovuta alla consistenza del progetto che non prevede un disassemblaggio per il trasferimento dopo un determinato periodo, ma doveva assumere il compito di **centro per la comunità** in quanto i suoi spazi sono adibiti a scuola per l'infanzia. Questo non esclude la possibilità di disassemblaggio ma le strategie vengono declinate in modi differenti in quanto non occupa il suolo per un periodo definito e limitato

Fonte immagini:

- <https://lacol.coop/projectes/la-balma/>

- <https://www.archdaily.com/971631/la-balma-collective-housing-lacol-plus-laboqueria>

PARTE 2



POLITICHE, PROGRAMMI E APPLICAZIONI



Dettaglio estetico dei moduli di facciata.



Posizionamento dei moduli di facciata in cantiere.

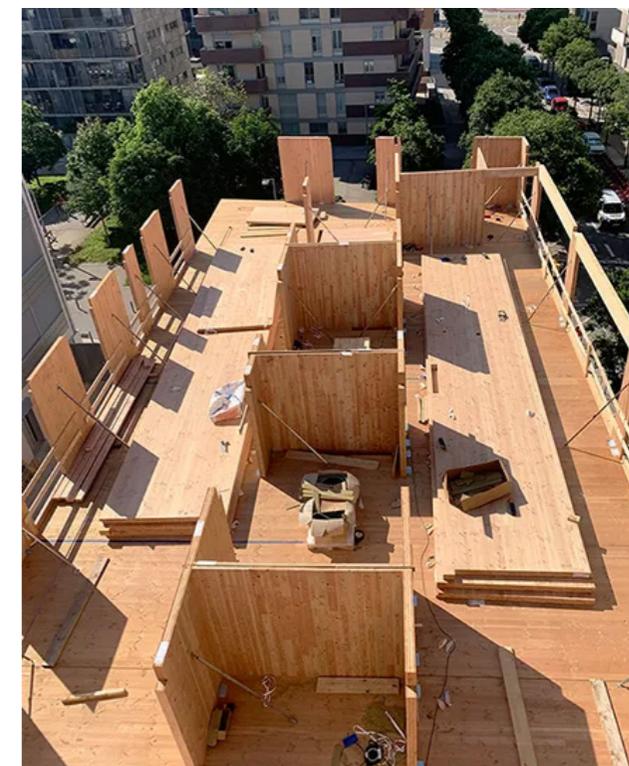
Un peso importante nella scelta di una struttura prefabbricata in pannelli CLT è dato dalla volontà di **ridurre tutti i consumi dell'edificio** dovuti ad impianti di climatizzazione. La scelta non implica automaticamente il raggiungimento di tale obiettivo ma permette, attraverso alcune **accortezze progettuali** il raggiungimento dell'obiettivo di comfort climatico interno.

A tale scopo, l'edificio è stato progettato in modo tale da garantire una **chiara suddivisione degli spazi riscaldati** e quelli no attraverso una compattezza degli spazi che ha permesso di isolare al meglio le zone abitate, dove il CLT è stato uno strumento di supporto a questo fine. **L'integrazione impiantistica** è data dall'inserimento di un sistema **Free-Cooling** per sopportare il caldo estivo, mentre l'impianto geotermico permette il riscaldamento dell'acqua sanitaria e il riscaldamento degli appartamenti.

Nonostante non sia previsto il disassemblaggio, i progettisti hanno realizzato il progetto assumendo come logica la **predisposizione a impianti** per il funzionamento dei pannelli fotovoltaici o le tubazioni per un sistema di recupero delle acque piovane o grigie. La **visione al futuro** e le accortezze riguardo il benessere interno attraverso strategie passive, sono un aspetto che dimostra come attraverso la logica e l'approccio progettuale indirizzato ad un'etica circolare e di decarbonizzazione, **l'utilizzo consapevole dei materiali lignei** e delle strategie Off-Site permette il raggiungimento di risultati architettonicamente interessanti. Il **progetto rimane aperto**, non risulta chiuso al suo completamento, come definito dalle logiche off-site e circolari

Per raggiungere gli obiettivi progettuali, la riduzione dei tempi e dei costi, un involucro prestazionale, attraverso un **sistema costruttivo ibrido** come questo, con struttura in **CLT con pannelli prefabbricati** e un basamento in CA, è necessario avere il controllo progettuale. Per raggiungerlo gli strumenti utilizzati in questo progetto sono stati lo sviluppo di un **Digital Twin** attraverso i software **BIM** e l'industrializzazione dei processi produttivi per la produzione dei componenti CLT. La definizione di **moduli e dimensioni per i pannelli funzionali al trasporto** hanno permesso di facilitarne anche il montaggio che è stato possibile effettuare attraverso un **autogru**, evitando così la necessità di gru fisse e ponteggi che avrebbero fatto lievitare i costi. L'articolazione spaziale dell'edificio in zone private e pubbliche permette di sfruttare al meglio gli spazi e riducendo le aree in cui è necessario di riscaldamento o raffrescamento durante la giornata.

“Il processo costruttivo off-site ha reso possibile rispettare i vincoli di budget, ridurre gli sprechi in cantiere e garantire una qualità elevata, senza rinunciare alla dimensione sociale dell'abitare”¹⁴²



Lavorazioni in stabilimento dell'azienda Byldis.



Movimentazione e stoccaggio delle componenti di facciata.

142 <https://divisare.com/projects/466935-lacol-laboqueria-taller-milena-villalba-la-balma-housing-cooperative>

Il caso spagnolo non è il solo ma vi sono altri contesti in cui l'emergenza abitativa viene affrontata in modo diverso. Ad esempio, il caso dei **Paesi Bassi** vede un'applicazione diversa delle strategie Off-Site. La nazione si trova attualmente a dover affrontare una carenza di alloggi pari a circa 400500 abitazioni secondo l'agenzia di ricerca ABF. Il numero di nuclei familiari cresce più velocemente rispetto alla costruzione di nuove case.¹⁴³ Oltre alla superficie ridotta dei Paesi bassi, 37391 km², la nazione è il secondo maggiore esportatore di prodotti agricoli e i terreni coltivabili sono estremamente importanti e per questa ragione i terreni edificabili sono ridotti.¹⁴⁴ A peggiorare la situazione vi è il graduale aumento della popolazione olandese, l'assenza di manodopera nel settore delle costruzioni e lo sviluppo di nuove abitazioni, la volontà di raggiungere lo zero emissioni nette del 2050 pone limitazioni al settore delle costruzioni e l'accelerazione delle privatizzazione del mercato immobiliare e il conseguente aumento dei costi degli immobili.

Uno dei maggiori problemi del mercato immobiliare olandese è la mancanza di alloggi sufficienti le per famiglie a medio reddito, tagliati fuori dall'assistenza economica per una abitazione popolare ma non possono nemmeno accedere al mutuo. Il patrimonio edilizio costruito tra gli anni 50 e 90 rappresenta il 60% del patrimonio immobiliare e circa il 30% necessita di urgente efficientamento energetico.

La bassa disponibilità di abitazioni fa sì che le liste di attesa per l'edilizia popolare, a cui si accede tramite un sistema a punti siano molto lunghe. Nel 2024, per accedere ad un'abitazione di edilizia popolare il tempo stimato era di 7 anni, ad eccezione di città più grandi come Amsterdam, dove può arrivare a 9 anni.

Per questa ragione, sono sorte 284 associazioni di edilizia che oggi possiedono circa il 75% delle case in affitto. Queste corporazioni sono indipendenti e senza scopo di lucro, sostengono, mantengono e provvedono alla gestione dell'edilizia sociale del paese. Queste corporazioni per poter finanziare altri interventi hanno la possibilità di affittare una quota dei loro alloggi con un canone libero.

143 <https://abfresearch.nl/publicaties/primos-prognose-2024/>

144 Trade of agricultural commodities 2000–2020, FAOSTAT ANALYTICAL BRIEF 44

I Paesi Bassi hanno implementato politiche e fondi per affrontare la crisi immobiliare, concentrandosi sull'aumento della costruzione di alloggi, sfruttando meglio lo stock esistente e garantendo l'accessibilità economica.

L'**Housing Act 2015** ha orientato le società immobiliari verso la costruzione, affitto e gestire alloggi sociali per individui a basso reddito e persone con difficoltà abitative.¹⁴⁵ La **National Housing Agenda** mira ad affrontare sfide chiave nel mercato immobiliare, tra cui le restrizioni geografiche che limitano l'elasticità dell'offerta. Per supportare questi sforzi, il governo ha destinato 17 aree residenziali su larga scala, note come aree NOVEX, che possono ospitare circa 400000 nuove case. Queste aree richiedono un approccio che integri lavoro, alloggio e trasporti, supportato da investimenti del **Mobility Fund** e dai bilanci delle aree.¹⁴⁶

Nella regione metropolitana di Amsterdam, l'**Environmental Act** semplifica e integra le leggi ambientali e di pianificazione territoriale, promuovendo la sostenibilità decentralizza il processo decisionale, incoraggia la partecipazione pubblica.¹⁴⁷ La regione di Amsterdam si è anche impegnata in pratiche edilizie sostenibili attraverso il **Green Deal Timber Construction**, che impone che il 20% delle nuove case venga costruito con legno o materiali di origine biologica. Questa iniziativa mira a ridurre le emissioni di CO2 e contribuire a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050.¹⁴⁸

145 <https://www.capitalvalue.nl/en/news/new-housing-act-in-the-netherlands-as-per-1-july-2015/>

146 <https://www.ruimtelijkeordening.nl/onderwerpen/aanpak-novex-gebieden/verstedelijkingengebieden>

147 <https://www.amsterdam.nl/wonen-bouwen-verbouwen/bouwen-verbouwen/omgevingsvergunning/omgevingswet/>

148 <https://www.ams-institute.org/news/signed-and-sealed-green-deal-timber-construction/>

Inoltre, i programmi nazionali **MIA** (Environmental Investment Deduction) e **Vamil** (Arbitrary depreciation of environmental investments) offrono agevolazioni fiscali per investimenti eco-sostenibili. Questi programmi consentono alle aziende di dedurre una parte significativa dei costi di investimento, promuovendo pratiche di costruzione sostenibili.¹⁴⁹

Dal fronte Europa, alcune società immobiliari hanno ricevuto finanziamenti sostanziali dalla Banca europea per gli investimenti (EIB). Ad esempio, la corporazione edilizia SintTrudo ha ricevuto un prestito di 350 milioni di euro per migliorare l'efficienza energetica delle abitazioni esistenti e costruire nuove case a zero consumo.¹⁵⁰

Allo stesso modo, la corporazione Eigen Haard ha ottenuto un prestito di 477 milioni di euro per costruire alloggi in affitto a basso consumo energetico ed efficientare gli esistenti. Ciò non toglie che anche aziende di edilizia privata possano ricadere in tali requisiti.¹⁵¹

Tutti questi fondi supportano gli sforzi dei Paesi Bassi per creare soluzioni abitative sostenibili e accessibili.

149 <https://business.gov.nl/subsidy/mia-vamil/>

150 <https://www.eib.org/en/projects/pipelines/all/20160448>

151 <https://www.eib.org/en/projects/all/20160237>

Nell'area NOVEX di Buiksloterham, un'ex area industriale di Amsterdam Nord, abbandonata dopo la chiusura delle attività della Fokker e della Shell, sorge il progetto **De Jakoba Social Housing** dello studio di architettura **Studioninedots**.

L'area è dal 2013 area di sperimentazione e si pensava a come, a livello architettonico e urbanistico, poter rinnovare l'area in modo sostenibile. Nel 2019 è stato creato il "Manifesto per Buiksloterham circolare" da parte degli architetti dello Studio Ninedots, in cui si promuovono i principi dell'economia circolare e la sperimentazione di pratiche sostenibili nell'area.¹⁵²

Il complesso **De Jakoba Social Housing** è uno degli esiti progettuali realizzati dopo anni di sperimentazioni da parte di Studioninedots. Esso offre **135 monolocali** in affitto destinati all'edilizia sociale, rappresentando una risposta diretta alla crescente domanda di alloggi a prezzi accessibili in città. Il progetto è stato realizzato grazie anche alla collaborazione della corporazione edilizia Ymere che nell'area sta finanziando lo sviluppo di 600 unità abitative di tipo sociale. Il progetto tende a **ridurre sia i costi di costruzione che i tempi**, rendendolo un modello efficiente e scalabile per rispondere rapidamente alla crisi abitativa. Per fare ciò utilizza sistemi di facciata prefabbricati in calcestruzzo, realizzati dall'azienda Byldis, progettati in base alla capacità della gru.¹⁵³

La prefabbricazione dei componenti di facciate interessa anche balconi e infissi, mentre parte della struttura portante è stata realizzata con elementi prefabbricati in calcestruzzo leggero, con l'obiettivo di un rapido assemblaggio. La prefabbricazione non solo accelera i tempi di costruzione, ma offre anche un'opportunità per **progettare soluzioni abitative flessibili**, infatti l'edificio, aumentando in altezza e arretrando in facciata, varia le dimensioni dei suoi alloggi in modo da poter andare incontro a esigenze variegata, dal monocale ad esigenze di nuclei familiari più numerosi.¹⁵⁴

¹⁵² <https://atlas.affordablehousingactivation.org/ficha/de-jakoba-amsterdam/>

¹⁵³ <https://studioninedots.nl/project/de-jakoba/>

¹⁵⁴ <https://www.domusweb.it/en/architecture/gallery/2023/11/25/de-jakoba-in-amsterdam.html>

Fonte immagini del progetto:

- <https://studioninedots.nl/project/de-jakoba/>
- <https://www.byldis.com/en/showcases/de-jakoba-amsterdam/>





Dettaglio estetico dei moduli di facciata.



Posizionamento dei moduli di facciata in cantiere.

Il calcestruzzo delle facciate è prodotto, lucidato e rifinito con sabbiatura e smerigliatura da Byldis. Tenendo conto delle possibili difficoltà sin da subito sia la produzione che il cantiere si è riusciti ad avere **elementi complessi** curvi rifiniti e a connettere le facciate tra loro anche se sfalsate piano per piano. L'azienda **Byldis**, produttrice dei componenti di facciata in calcestruzzo prefabbricati ha spiegato, nella presentazione del progetto, come questi componenti abbiano permesso di realizzare un architettura che non deve fare un **compromesso tra qualità e quantità**. Questo concetto è dato dalla logica per cui, la produzione di componenti attraverso l'industrializzazione dei processi, garantisce la possibilità di **personalizzazione** degli stessi e quindi, in questo progetto, vediamo come la produzione su larga scala di un componente personalizzato permetta di ridurre i costi mantenendo una qualità architettonica elevata.

La prefabbricazione dei componenti ha permesso la loro realizzazione in un anno, nonostante le loro complessità. Tra le **complessità di realizzazione**, oltre alla forma di questi componenti, difficilmente realizzabili con getti in opera, troviamo la complessità delle connessioni dovute allo sfalsamento della facciata. Prevedendo la produzione in stabilimento è stato possibile realizzare questi componenti con **precisione** e con **accorgimenti** per la loro posa in opera, riducendo i rischi di errori.¹⁵⁵

¹⁵⁵ <https://www.byldis.com/en/showcases/de-jakoba-amsterdam/>

Il progetto mostra come il raggiungimento di obiettivi come la **qualità, ricercatezza estetica ed economicità** dell'intervento sono raggiungibili senza compromessi attraverso l'industrializzazione edilizia. In questo progetto, la produzione in stabilimento dei **componenti modulari di facciata** ha permesso di ridurre i tempi, ottenere un risparmio oltre che riuscire a realizzare un elemento con forme difficilmente realizzabili a larga scala in cantiere.

La produzione in stabilimento permette di realizzare lavorazioni di finitura su queste componenti per produrre un componente personalizzato. La standardizzazione, in questo caso specifico avviene per la catena di produzione di queste componenti, personalizzate e destinate a questo progetto. L'entità del progetto, di grandi dimensioni, è un aspetto che favorisce questa scelta ma questa è possibile grazie ai principi di Mass Customization insiti nell'industrializzazione edilizia.



Lavorazioni in stabilimento dell'azienda Byldis.



Movimentazione e stoccaggio delle componenti di facciata.

Il progetto **MOOS Euterpe**, ha una genesi differente rispetto al De Jakoba Social Housing. Questo progetto nasce dalla collaborazione tra lo studio **Concrete Architecten** e l'azienda **MOOS** che ha portato allo sviluppo del modulo prefabbricato realizzato in CLT "**Our House**". L'intervento interessa la costruzione di 30 unità abitative realizzati con i moduli prefabbricati da loro sviluppati. Nel progetto, i componenti 3D, possono essere di due tipologie, così da generare differenti soluzioni, dai monocalci ad appartamenti fino a quattro camere da letto. Ogni unità abitativa, è realizzata con **due componenti modulari** uno destinato agli spazi di servizio, cucina, bagno e una camera e il secondo è un modulo che permette di essere utilizzato secondo le esigenze dell'occupante e presenta un balcone esterno. Il progetto è destinato ad edilizia sociale per offrire soluzioni abitative a studenti, rifugiati ucraini e nuclei familiari in cerca di una casa.¹⁵⁶

L'obiettivo progettuale è quello di **sperimentare l'adozione di questi moduli** per realizzare in tempi brevi e con una qualità elevata edifici per il social housing e non solo. I componenti tridimensionali sviluppati da MOOS vengono realizzati in stabilimento, dove vengono inseriti serramenti, impianti elettrici e idraulici, cucina, bagno e finiture. Trasportati in cantiere necessitano dell'assemblaggio e la connessione degli impianti attraverso il principio "**Plug and Play**"¹⁵⁷ il che permette di ridurre i tempi e gli sprechi di materiale in cantiere, facilitando l'assemblaggio ed evitando errori e infiltrazioni nei moduli prefabbricati.¹⁵⁸

¹⁵⁶ <https://archello.com/it/news/concrete-e-moos-completano-un-progetto-di-edilizia-sociale-sostenibile-e-modulare>

¹⁵⁷ Installazione dei componenti attraverso un sistema ad innesto che non richiede operazioni di cablaggio o isolamento. Questo è possibile grazie alla codificazione delle connessioni e ad una logica di industrializzazione edilizia.

¹⁵⁸ <https://www.v2com-newswire.com/en/newsroom/categories/residential-architecture/press-kits/1472-19/moos-a-green-and-social-housing-revolution>

Fonte immagini del progetto:

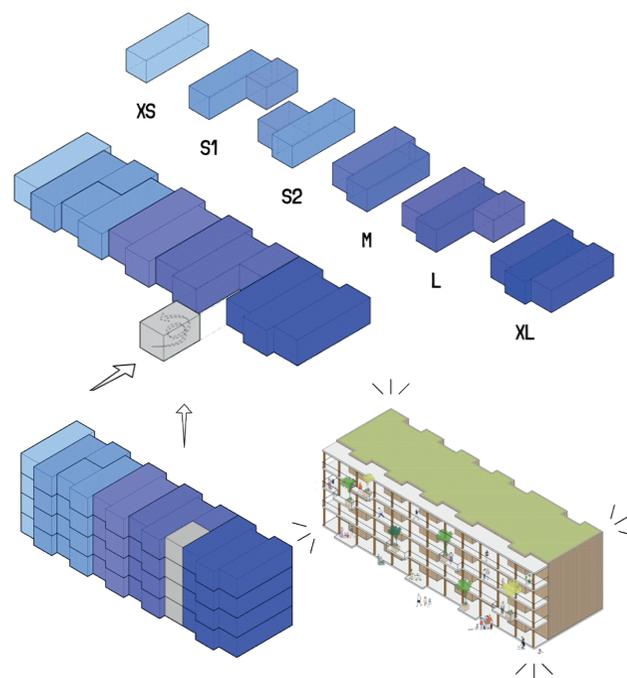
<https://www.architecturelist.com/moos-revolutionizing-urban-living-with-style/>

<https://wijzijnmoos.nl/our-street/project-euterpe/>

PARTE 2



POLITICHE, PROGRAMMI E APPLICAZIONI



Concept di progetto per l'assemblaggio dei moduli nel progetto MOOS Euterpe



Unità abitata M, vista interna.

I moduli realizzati in CLT seguono la **visione aziendale di circolarità**, portata avanti attraverso la **valorizzazione dei materiali** utilizzati e dei componenti realizzati. Ogni modulo possiede infatti una scheda tecnica digitale dove vengono **raccolte tutte le informazioni** relative ai materiali utilizzati per la sua realizzazione, le pratiche di manutenzione e le istruzioni per il disassemblaggio. Con questo strumento, si mira a **monitorare l'intero ciclo di vita** e facilitare i processi circolari. È in funzione di questi che l'azienda punta ad una *“riduzione dell'uso di materie prime in favore di materiali sostenibili, riciclati e upcycled, raccolti da partner che si occupano di demolizioni”*. I pavimenti sono stati realizzati con calcestruzzo riciclato così come i ballatoi esterni che fungono da elemento distributivo.¹⁵⁹

Le unità abitative sono smontabili e possono essere riassemblate in un sito differente in futuro, così come permettono di **ampliare la loro disposizione attuale**. Attualmente i moduli sono disposti per formare due edifici paralleli che formano uno spazio protetto che i residenti possono utilizzare come giardino comune. Gli edifici sono di due piani, il cui ritmo è dato dai serramenti e dal sistema distributivo.¹⁶⁰

159 <https://wijzijnmoos.nl/our-house/>

160 <https://www.azuremagazine.com/article/rotterdam-modular-housing-moos-euterpe-concrete/>

Questo progetto rappresenta un passo importante per gli attori coinvolti e per il panorama architettonico dei Paesi Bassi, in quanto si è concretizzata la visione che prevedeva la realizzazione di questo sistema costruttivo come una piattaforma adattabile per differenti progetti. Le unità 3D, grazie alla loro modularità e al **Material Passport**, possono essere smontate e riutilizzate ma anche rimanere sul sito per essere mantenute, aggiornate e se necessario implementate.

Essendo questo progetto una concretizzazione delle **sperimentazioni** fatte da MOOS e dallo studio Concrete, il progetto si è limitato a due piani ma la loro collaborazione, grazie all'eccellente risultato ottenuto¹⁶¹

Eventualmente i moduli si potrebbero impilare e avere edifici più alti, in questo caso, trattandosi di una sperimentazione si è rimasti su due. Questo, infatti, è il primo progetto di Moos per dimostrarne l'efficacia. Una volta dimostrata, Moos ha applicato lo stesso metodo per altri progetti, come quello ad Amsterdam “Appleweg”, grazie anche ai fondi da 14 mln per case flessibili disposti dalla Città stessa e il Governo, e come nel progetto già visto a Moos Brasa Village.

161 Il progetto è risultato vincitore del premio Architizer nella categoria “Affordable Housing” e il premio internazionale nella categoria “politica territoriale” del Cittaslow International



Assemblaggio dei moduli prefabbricati per la costruzione di MOOS Euterpe



Produzione dei moduli Our House di Moos per Euterpe

Il progetto **Moos Brasa Village** è un intervento a scala urbana per la realizzazione di un quartiere temporaneo che comprende 520 abitazioni distribuite in 13 edifici. Il suo obiettivo è quello di fornire **soluzioni abitative flessibili**, sostenibili e in tempi rapidi, per rispondere alla domanda per residenze sociali. Queste abitazioni, realizzate grazie alla collaborazione di cooperative edilizie, come sancito dall'Housing Act del 2015, in collaborazione con gli studi di architettura Concrete, FARO e RU+PA, sono state progettate per essere "flexhomes" realizzate in moduli che occuperanno il sito per circa 15 anni. Questa strategia architettonica prevede la possibilità che questi moduli vengano disassemblati o trasferiti in altri siti.¹⁶²

Tra gli edifici in fase di realizzazione, il progetto realizzato da Concrete e Moos, il **Parkgebouw** o Edificio O, vede l'applicazione dei principi di circolarità, di industrializzazione edilizia e l'utilizzo di **componenti CLT**. Articolato su otto piani e con 105 appartamenti, l'Edificio O sarà il complesso modulare CLT più alto nei Paesi Bassi.¹⁶³

La collaborazione con un partner tecnico come **Moos**, ha permesso, grazie alle loro esperienze e approccio sistemico alla costruzione, la realizzazione di moduli prefabbricati con il loro sistema "Our House" in CLT e solai in cemento, che seguono i principi di circolarità. Il progetto incorpora pavimenti in calcestruzzo riciclato e inoltre l'innovativo **Beyond Wall System** sviluppato dall'azienda FRONT e Fassat, che consente facciate e pareti interne smontabili senza l'uso di malta o colla. Questo sistema consente di fissare meccanicamente i listelli di mattoni alla sottostruttura in legno, rendendoli facili da smontare e rimontare, supportando così un'economia circolare.¹⁶⁴

L'approccio circolare di Moos introduce uno strumento innovativo e significativo per la semplificazione della manutenzione e disassemblaggio dei moduli. Essi hanno appunto una **scheda digitale** che descrive le procedure da attuare per il recupero e la sostituzione dei materiali utilizzati.¹⁶⁵

¹⁶² <https://faro.nl/projecten/brasa-village/>

¹⁶³ <https://concreteamsterdam.nl/moos-brasa-village-amsterdam>

¹⁶⁴ <https://wijzijnmoos.nl/our-street/project-brasa-village-2/>

¹⁶⁵ <https://www.front-materials.com/projects/demountable-facade-social-housing-project-amsterdam/>

Fonte immagini del progetto:

<https://concreteamsterdam.nl/moos-brasa-village-amsterdam>

<https://wijzijnmoos.nl/our-street/project-brasa-village-2/>



MOOS BRASA VILLAGE

RU + PA, CONCRETE, FARO
AMSTERDAM, 2025



Posizionamento dei moduli in cantiere.



Trasporto dei moduli in cantiere tramite bilico ribassato.

L'edificio O è stato finanziato da Rochdale ma essendo l'intero progetto di ampie dimensioni si trova la collaborazione anche di Ymere e Eigen Haard per gli altri blocchi. Questa collaborazione si estende anche per le aziende della prefabbricazione dei moduli che per le imprese edili coinvolte. Brasa Village è progettato per soddisfare una **vasta gamma di residenti**, tra cui residenti locali, acquirenti di prima casa, studenti, giovani e operatori sociali. Il 70% delle case viene affittato tramite **WoningNet**¹⁶⁶, e circa il 30% viene assegnato dal comune a rifugiati con status di rifugiato. La possibilità di realizzare velocemente tali alloggi era fondamentale, motivo per cui la prefabbricazione è stata scelta, inoltre per poter accedere a più fondi sono state fatte delle scelte mirate alla sostenibilità.¹⁶⁷

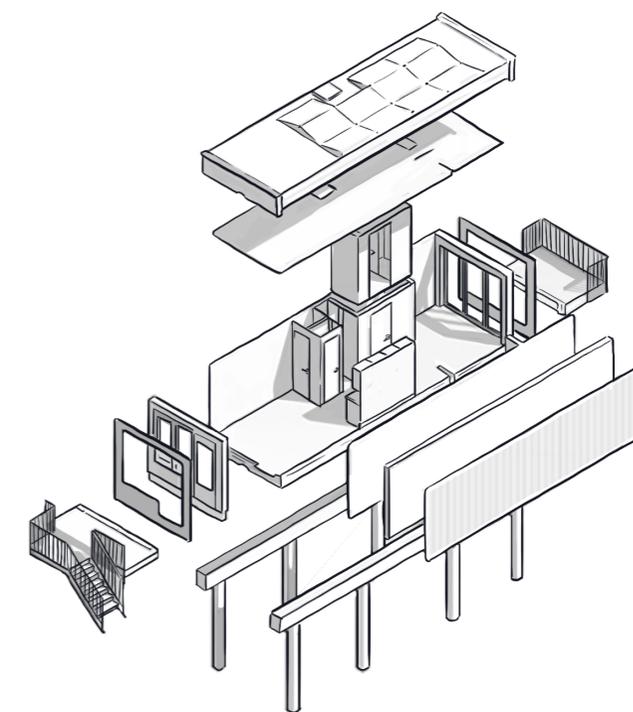
Per queste ragioni, l'intervento vede il concetto di **flexhomes** come strategia principale. Questa tipologia costruttiva risponde alle necessità di sviluppare un progetto a larga scala in breve tempo, riducendo i rischi di interferenze tra i diversi attori coinvolti sul sito di progetto e sviluppare un progetto temporaneo in cui vengano sperimentate nuove forme di edilizia circolare e industrializzazione edilizia.

¹⁶⁶ WoningNet è un'organizzazione olandese che gestisce il servizio di intermediazione di alloggi per conto di circa 200 imprese di edilizia residenziale sociale

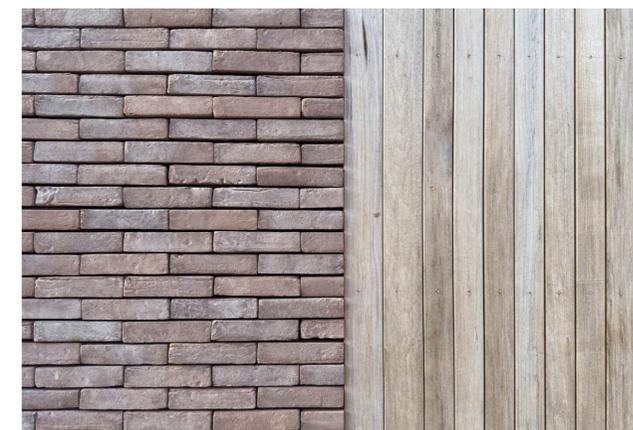
¹⁶⁷ <https://www.brasavillage.nl/>

Il progetto sviluppato da Concrete e Moos rappresenta una caso a cui fare riferimento per l'industrializzazione edilizia e i principi di circolarità sostenuti. La strategia di sviluppo del progetto è riuscita a raggiungere l'obiettivo di **produrre in tempi brevi** alloggi per residenze sociali riducendo le emissioni e **valorizzando i materiali utilizzati**. Per fare questo sono state fondamentali le strategie legate ai MMC, riducendo i tempi di costruzione in cantiere e permettendo di produrre moduli su di una base standardizzata in stabilimento. L'ibridazione nella struttura portante tra **CLT e calcestruzzo riciclato** dimostra come la scelta dei materiali è un mezzo importante per il raggiungimento di prestazioni architettoniche e ambientali. La combinazione di questi materiali permette di ottenere alte prestazioni strutturali e termo-fisiche da parte del CLT e di aumentare la rigidità per evitare deformazioni da parte del calcestruzzo riciclato.

L'approccio progettuale declinato alla temporaneità dell'occupazione del sito ha permesso di approfondire l'utilizzo delle logiche DfD e DfMA. La quasi totalità dei componenti utilizzati è stato assemblato con sistemi a secco, in modo da facilitare il disassemblaggio. Inoltre, tramite l'industrializzazione edilizia e software BIM, è stato possibile ottimizzare la concezione dei moduli e gestire le complessità dovute alla produzione e l'assemblaggio.



Esploso modulo "Our Homes" prodotto dall'azienda MOOS.



Beyond Wall System con 2Good2Waste Raw WasteBasedSlips, prodotta da FRONT.

L'emergenza abitativa, nei Paesi Bassi come in altri contesti europei, non interessa solamente nuclei familiari e persone con redditi bassi ma anche i redditi medie e in particolare determinate categorie di lavoratori. Con questo fine nasce il progetto **Juf Nienke** sull'isola centrale di IJburg ad **Amsterdam**, 61 unità abitative in affitto. La metà di queste sono destinate a **famiglie a medio reddito** mentre la restante parte sono destinate ad **insegnanti e professionisti del servizio pubblico**. La mancanza di alloggi adeguati per questa tipologia di lavoratori ha portato ad una carenza di insegnanti e servizio pubblico nella città di Amsterdam. L'iniziativa è privata, promossa dallo sviluppatore **Dokvast** e realizzato con la collaborazione degli studi **RAU e SeARCH**. La logica dell'intervento, realizzazione in breve tempo per avere un ritorno dell'investimento nel più breve tempo possibile, ha portato i progettisti ad optare per un sistema costruttivo modulare, **composto da moduli 3D prefabbricati in legno**.¹⁶⁸

L'attenzione verso i materiali e la loro valorizzazione risponde alla visione dello sviluppatore immobiliare Dokvast, il quale investe in progetti immobiliari sostenibili, circolari ed a basso consumo energetico. Per questa ragione i materiali usati sono stati scelti in un'ottica di **riduzione delle emissioni e dei rifiuti** mentre i **sistemi costruttivi modulari sono smontabili**, con la possibilità di riconfigurare la disposizione e la configurazione spaziale dell'intero complesso. Assemblati in loco, questi moduli realizzati con **pannelli in legno a telaio e in CLT**, presentano una larghezza fissa di 4 metri e lunghezze variabili. Le possibilità di configurazione dei moduli hanno permesso la definizione di appartamenti che possono variare da 48 m² ai 115 m².¹⁶⁹

Il complesso presenta un basamento realizzato in calcestruzzo dove trovano spazio una **scuola per l'infanzia e una palestra**, e i moduli sono posizionati sopra di esso. La disposizione dei volumi residenziali forma una corte centrale, ad una quota rialzata, dove la vegetazione del giardino, unita alle terrazze e la copertura verde massimizzano il potenziale di **ritenzione delle acque piovane**. Sul solaio di copertura è anche posizionato un impianto fotovoltaico che per **ridurre la dipendenza energetica** delle unità abitative dalla rete pubblica.¹⁷⁰

168 <https://www.search.nl/news/juf-nineke-officially-opened/>

169 <https://www.dokvast.com/project/woon-werkgemeenschap-juf-nienke/>

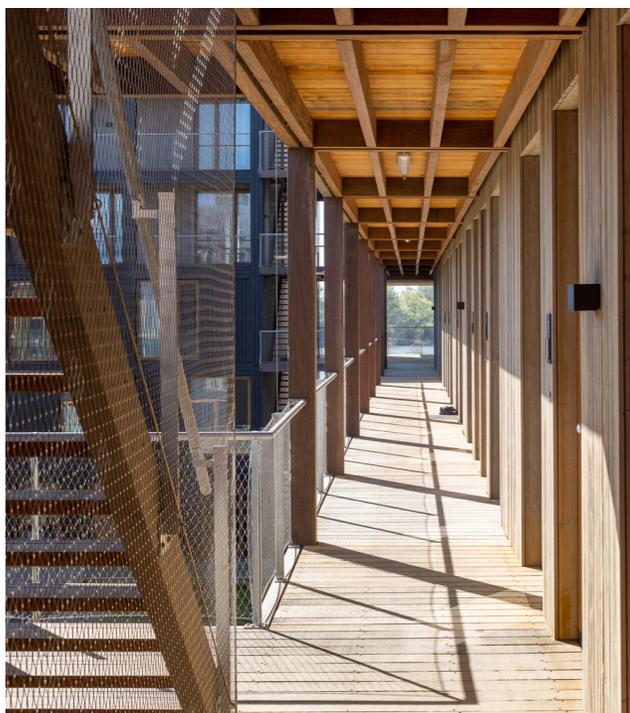
170 <https://www.archdaily.com/999856/juf-nienke-apartments-search-plus-rau>

Fonte immagini del progetto:

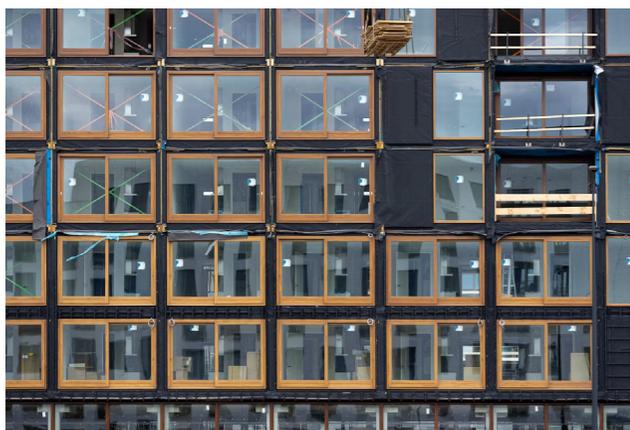
<https://www.search.nl/news/juf-nineke-officially-opened/>

<https://archello.com/pt/project/juf-nienke-2>





Vista sugli spazi interni realizzati con componenti lignee.



Assemblaggio dei moduli prima del posizionamento degli elementi di facciata prefabbricati.

L'architetto Thomas Rau, fondatore dello studio RAU, durante un'intervista spiega come il progetto abbia dovuto rispondere a **standard molto elevati** imposti dal comune di Amsterdam. I sistemi costruttivi Off-Site è stata la strategia per raggiungere obiettivi che, "utilizzando metodi tradizionali, il livello di prestazioni desiderato non sarebbe stato semplicemente raggiungibile".¹⁷¹

Durante l'intervista, l'architetto ha espresso come il costruire con moduli tridimensionali in legno **non sia semplice** e che il loro utilizzo non porti automaticamente il raggiungimento degli obiettivi. L'esperienza degli studi coinvolti nella realizzazione di edifici in legno ingegnerizzato ha permesso loro di **superare le difficoltà** dovute a **normative** e richieste degli **appaltatori**, oltre a titubanze date dai **clienti ed investitori**.

Queste dichiarazioni dimostrano come l'industrializzazione edilizia e i sistemi costruttivi in legno ingegnerizzato **non siano una soluzione universale** per il raggiungimento di standard qualitativi elevati e di come siano presenti ancora resistenze da parte del pubblico nel loro utilizzo. La filiera edilizia è interessata da un cambiamento nella gestione del progetto e per quanto riguarda l'architettura Off-Site, il supporto tecnico, tecnologico, logistico e culturale è fondamentale.

I principi di circolarità espressi dal progetto vedono l'utilizzo dell'80% dei materiali per la costruzione, riutilizzabile e rientra nella classe ambientale 1 della classificazione nazionale olandese sui materiali da costruzione.¹⁷²

¹⁷¹ https://www.rau.eu/wp-content/uploads/2015/03/20220713-summer_update_Juf_Nienke.pdf

¹⁷² <https://www.volantess.nl/en/projects/the-most-sustainable-residential-building-in-the-netherlands/>

Il progetto rappresenta una **esperienza differente** dalle precedenti e le scelte progettuali sono definite dagli attori e dalla tipologia di progetto. In comune con i due progetti precedenti, **Juf Nienke**, è realizzato con moduli 3D in legno ingegnerizzato ma la ragione che ha portato alla loro scelta è differente. Il progetto ha la necessità di rispettare gli standard fissati dal comune e per questa ragione, ha orientato la loro logica costruttiva verso sistemi che permettessero l'utilizzo di **materiali bio-based** e sistemi costruttivi con un **controllo della qualità e delle prestazioni**. Il **know how** degli studi di architettura e dello sviluppatore immobiliare ha garantito la buona riuscita del progetto. Emerge come, oltre che per motivi di occupazione temporanea del sito e per necessità di riconfigurazioni, i moduli tridimensionali possono essere utilizzati per il **raggiungimento di standard prestazionali** e per **aumentare il controllo del progetto**.



Posizionamento dei moduli in cantiere.



L'utilizzo di autogrù e un numero limitato di operatori per il posizionamento dei moduli prefabbricati.

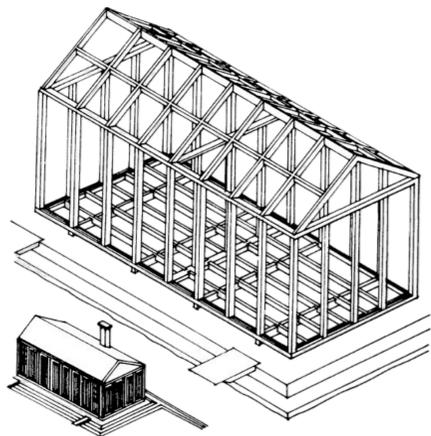
INDUSTRIALIZZAZIONE EDILIZIA: EVOLUZIONE DEI SISTEMI COSTRUTTIVI E LE CONSEGUENZE SULLA FILIERA

PARTE 3 /

L'applicazione delle strategie Off-Site è stata incentivata anche da politiche e programmi europei che hanno portato risultati eterogenei in contesti e ambiti differenti

3.1 I SISTEMI COSTRUTTIVI PREFABBRICATI IN LEGNO E STRATEGIE OFF-SITE

I casi studio analizzati mostrano come l'architettura Off-Site presenta **differenti soluzioni** in termini di **sistemi costruttivi, grado di industrializzazione e integrazione impiantistica**.¹⁷³ È importante evidenziare come questi siano attuati grazie ad un'evoluzione dei concetti di prefabbricazione che ci ha portato ad individuare la prefabbricazione leggera, o Off-site, come una strategia trasformativa per il settore edilizio. L'applicazione pratica dimostra come questo settore possa divenire **più resiliente, ecologico e competitivo**, attraverso un cambio di paradigma sistemico della logica costruttiva. L'introduzione di **logiche produttive industriali, di strumenti digitali** e materiali sostenibili differenzia le applicazioni attuali rispetto alle sperimentazioni riguardo la prefabbricazione definita **pesante** degli anni Sessanta e Settanta. Le applicazioni attuali si pongono in continuità con le precedenti ma allo stesso tempo in rottura con esse. Comprendere come l'applicazione della prefabbricazione sia cambiata e che impatto hanno avuto le **innovazioni** concettuali, tecniche e tecnologiche nella sua evoluzione risulta importante per delineare la portata di questa trasformazione nel settore delle costruzioni.



Il Manning Portable Colonial Cottage for Emigrants era un sistema prefabbricato in legno e pannelli di riempimento. Sviluppato da Manning, questa era una soluzione rapidamente implementabile per le colonie britanniche in rapida espansione in Nuova Zelanda e Sudafrica durante il diciannovesimo secolo.

All'interno dell'architettura moderna, la prefabbricazione ha una lunga e complessa storia. Le prime case smontabili trasportate nelle colonie britanniche, come il **Manning portable colonial cottage for emigrants** del 1833, realizzata da H. John Manning, possono essere assunte come le **prime forme di prefabbricazione** dell'architettura moderna, ma nel Novecento, e in particolare nel **secondo dopoguerra**, che la prefabbricazione trova una più ampia applicazione nel settore dell'edilizia, entrando nella vita comune come concetto e come applicazione pratica. L'adozione su larga scala di sistemi di **prefabbricazione pesante**, in molti casi utilizzata per progetti di edilizia residenziale pubblica o popolare, è stata una risposta alla necessità di **ricostruire le città** europee bombardate durante la Seconda Guerra Mondiale e di rispondere al boom urbano con soluzioni che riducessero i tempi.¹⁷⁴

I sistemi costruttivi prefabbricati pesanti adottati da questi progetti erano realizzati con elementi strutturali in **calcestruzzo armato**, prodotti in stabilimento e assemblati

¹⁷³ Smith, R. E. (2010). Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction. Wiley.

¹⁷⁴ Frampton, K. (2007). Modern Architecture: A Critical History. Thames & Hudson.

in loco, oppure, prodotti direttamente in loco, nei pressi del cantiere dove veniva allestita la **produzione standardizzata** di questi componenti.¹⁷⁵ Con la loro estetica funzionale e una progettazione orientata alla **massimizzazione della quantità** e non della qualità o varietà architettonica, queste soluzioni costruttive erano **fortemente standardizzate e modulari**. In molti casi, risultati ottenuti da questo approccio progettuale furono edifici ripetitivi, **decontestualizzati** e ambienti urbani monotoni che nel tempo comportarono una **stigmatizzazione** del termine prefabbricato.¹⁷⁶ Non tutti i casi furono degli insuccessi, e dove questo avvenne, vi fu una concatenazione di eventi quali il **supporto di un tessuto industriale** con una visione innovativa, un **maggiore coordinamento** tra le fasi architettonica, quella produttiva e le politiche abitative.¹⁷⁷

Queste applicazioni erano segnate da diverse problematiche date dalla declinazione della prefabbricazione pesante e vincoli imposti dalle metodologie, come la **progettazione rigidamente vincolata**, le dimensioni e le caratteristiche di componenti prefabbricati, e aspetti più tecnici come le **connessioni strutturali** tra i pannelli che risultavano spesso complesse, **poco flessibili** e difficili da mantenere. A segnare negativamente queste applicazioni vi era l'**integrazione impiantistica limitata**, il che andava a determinare un discomfort degli utenti dovuto alle prestazioni dell'involucro e dell'integrazione impiantistica e dei serramenti.¹⁷⁸

Queste sperimentazioni furono l'applicazione dei **principi di industrializzazione** che segnarono alcune architetture sviluppate prima della guerra e a ridosso da architetti che hanno scritto la storia dell'architettura moderna appartenenti alla cultura **funzionalista** e nelle istanze delle avanguardie industriali del primo Novecento.¹⁷⁹ Oggi l'industrializzazione in architettura è legata a innovazioni digitali, utilizzo di macchinari robotizzati e materiali come il legno ingegnerizzato, ma l'idea di costruire architetture attraverso processi di standardizzazione, seriali e razionalizzati affonda le sue radici prima dell'era digitale.

¹⁷⁵ Malazdrewicz, S., Ostrowski, K. A., & Sadowski, Ł. (2022). Large Panel System Technology in the Second Half of the Twentieth Century—Literature Review, Recycling Possibilities and Research Gaps. Buildings.

¹⁷⁶ Banham, R. (1965). A Home is not a House. Art in America.

¹⁷⁷ Lessing, J. (2006). Industrialised House-Building: Concept and Processes. Licentiate Thesis, Lund University.

¹⁷⁸ Ibidem

¹⁷⁹ Frampton, K. (2007). Modern Architecture: A Critical History. Thames & Hudson.

Fonte immagine: Smith, R. E. "Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction"

Dalla seconda metà dell'Ottocento l'architettura si confronta con la necessità di **costruire in modo più rapido ed economico** aumentando la qualità architettonica tramite il **controllo dei processi costruttivi**, e questo è avvenuto per rispondere all'urbanizzazione crescente e alla domanda di nuove tipologie edilizie. Il **Crystal Palace**, realizzato nel 1851 da Joseph Paxton per l'Esposizione Universale di Londra fu un'architettura che dimostrava le possibilità dei **processi di industrializzazione**. Realizzata con una struttura interamente prefabbricata in **ferro e vetro**, montata in pochi mesi grazie all'**assemblaggio di componenti prodotti in stabilimento**, era un'applicazione di un sistema di costruzione modulare, capace di essere replicato, smontato e riassemblato. Il ruolo di questa architettura, grazie alle sue dimensioni e all'impatto culturale, fu quello di **dimostrare** che l'architettura poteva essere realizzata fuori dal cantiere.¹⁸⁰

Nel Novecento, molti architetti e ingegneri approcciarono l'industrializzazione dell'architettura cercando di sviluppare soluzioni rappresentative di questa visione. Tra i pionieri che hanno ottenuto un maggior riconoscimento troviamo **Jean Prouvé**, architetto, designer e ingegnere, di origine francese che riuscì, grazie alla sua capacità di integrare la produzione industriale nell'architettura, a sviluppare la sua idea che vedeva l'edificio come una **macchina da abitare**, costruita attraverso **componenti assemblabili, prodotti in serie**. L'applicazione di questi concetti nella progettazione portò alla progettazione e realizzazione di case prefabbricate per i territori coloniali, come la **Maison Tropicales** del 1951, architetture concepite come leggere, smontabili ed adattabili al contesto geografico e climatico. Prouvé credeva che l'Architettura che non era solo una questione tecnica, ma anche **politica e sociale**, e l'industrializzazione poteva essere il mezzo per la realizzazione di un'**architettura democratica e ripetibile** ma mai priva di qualità estetica.¹⁸¹



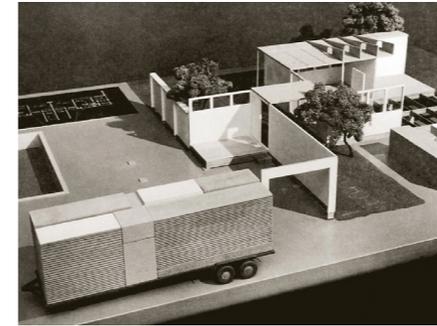
Crystal Palace, Joseph Paxton, 1851

Fonte: < <https://www.britannica.com/> >



Maison Tropicales, Jean Prouvé, 1951

Fonte: < <https://arquitecturaviva.com/> >



Packaged House System, Konrad Wachsmann e Walter Gropius, 1941

Fonte: < <https://arquitecturaviva.com/works/packaged-house-1> >



Dymaxion House, Buckminster Fuller, 1951

Fonte: < <https://www.archdaily.com/401528/ad-classics-the-dymaxion-house-buckminster-fuller> >

Parallelamente, architetti come **Konrad Wachsmann e Walter Gropius** stavano sviluppando il loro concetto di casa industriale componibile. Il loro progetto **Packaged House System**, si basava sull'idea che un nodo tridimensionale potesse connettere elementi prefabbricati in legno. L'elemento chiave era quindi la **connessione tra elementi** ed esso veniva concepito come **dispositivo costruttivo** alla base del sistema costruttivo. Una visione quasi meccanicistica, ma poneva le basi per la logica della progettazione sistemica, centrale nella concezione della prefabbricazione attuale.¹⁸²

Il lavoro di Prouvé si basa sulla leggerezza dei componenti e sulla leggerezza dei **componenti assemblabili e prodotti in serie**, quello di Wachsmann e Gropius sulla logica modulare e sulle connessioni mentre il lavoro di **Buckminster Fuller** era una estremizzazione dei concetti di efficienza costruttiva. I suoi progetti più celebri, le cupole geodetiche e la **Dymaxion House**, sono tentativi audaci di costruire con il minimo utilizzo di materiale possibile, facendo affidamento a principi dell'industria aerospaziale. I suoi progetti non si limitavano a produrre nuove forme ma proponevano una **concezione costruttiva** in cui l'edificio veniva assunto come un **sistema autosufficiente, leggero, sostenibile e replicabile**.¹⁸³

Gran parte delle visioni pionieristiche, per quanto innovative e portatrici di valori pionieristici rimasero **confinati nel campo della sperimentazione**, il loro impatto sulla produzione fu limitato, soprattutto a causa delle tecnologie adatte per supportarle. Difficoltà nella **gestione della logistica** e della **resistenza culturale** a una forma di costruzione caratterizzata da **aspetti tecnici piuttosto che formali**, ridusse la sua diffusione. L'utilizzo di logiche legate alla standardizzazione fece sì che la prefabbricazione fu rapidamente associata a una **perdita di valore architettonico** dovuto alla ripetizione di geometrie e articolazioni spaziali. Questa concezione assunse un valore maggiore quando vide l'applicazione delle logiche di prefabbricazione nella realizzazione dei grandi complessi residenziali post-bellici costruiti in calcestruzzo prefabbricato, edifici funzionali ma spesso **privi di identità e quindi criticati**.¹⁸⁴

180 Curtis, W. J. R. (2006). *L'architettura moderna dal 1900* (3ª ed.). Phaidon.

181 ArtDaily. (2007, giugno 1). *Jean Prouvé's Prototype Maison Tropicale at Christie's*. ArtDaily. Retrieved [06/08/2025], < <https://artdaily.cc/news/20283/Jean-Prouve-s-Prototype-Maison-Tropicale-at-Christie-s> >

182 Smith, R. E., & Quale, J. D. (2017). *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge.

183 Pawley, M. (1990). *Buckminster Fuller*. Taplinger Publishing.

184 Abbe, J., & Jones, A. (2025). Impacts of prefabrication in the building construction industry. *Sustainability*, 3(1), Article 3. < <https://www.mdpi.com/2673-8392/3/1/3> >

Il significato architettonico della prefabbricazione pesante risiede nel **tentativo di industrializzare l'edilizia** seguendo i principi della produzione seriale, della standardizzazione tipologica e della modularità dimensionale. Si auspicava che queste logiche potessero portare a benefici specifici in termini di costi, tempi realizzativi, controllo della qualità e replicabilità, obiettivi e intenzioni che rappresentavano un mezzo per la democratizzazione dell'abitare, tematica ispirata ai principi del welfare urbano della Carta di Atene.¹⁸⁵ Un esempio rappresentativo sono i sistemi **Large Panel System LPS**, sviluppati in Europa Orientale e successivamente adottati anche in Italia e Francia. Questi sistemi consistevano in pannelli prefabbricati che costituivano **l'intera struttura dell'edificio** e venivano applicati in progetti a scala urbana. In Francia, un caso rappresentativo è il **Grand Ensemble** realizzato a Sarcelles negli anni Settanta. Questo progetto sintetizza le potenzialità e i limiti di questo sistema che proponeva velocità costruttiva ma anche alienazione spaziale e mancanza di qualità urbana.¹⁸⁶

Negli ultimi decenni, anche in risposta alle critiche accumulate nel tempo, la prefabbricazione ha subito un **processo di rinnovamento profondo**, sfociato in una nuova declinazione: **prefabbricazione leggera o Architettura Off-site**. Questa tipologia di modello costruttivo non si fonda sulla pesantezza strutturale del calcestruzzo armato ma sull'**utilizzo di materiali leggeri, sostenibili e predisposti ai processi di industrializzazione**, come il legno ingegnerizzato, l'acciaio e componenti prefabbricati composti da più materiali e sistemi a secco.¹⁸⁷

La leggerezza garantita da questi materiali e componenti **facilita il trasporto** e quindi la possibilità di realizzare i componenti edilizi in stabilimento per poi essere trasportati ed assemblati in cantiere, dove grazie al supporto di macchinari anche in quantità ridotta, possono essere facilmente trasportati e assemblati a secco. La categorizzazione di prefabbricazione leggera è dovuta non solo alla leggerezza dei materiali che vengono utilizzati maggiormente in questi modelli costruttivi ma anche alla **lavorazione che i sistemi costruttivi comportano** in termini di lavoro, di movimentazione e assemblaggio.

¹⁸⁵ Le Corbusier (1941). *La Ville Radieuse*. Editions de l'Architecture d'Aujourd'hui.

¹⁸⁶ Mumford, E. (2000). *The CIAM Discourse on Urbanism, 1928–1960*. MIT Press.

¹⁸⁷ Smith, R. E. (2010). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. Wiley.



Grand Ensemble Sarcelles, Jacques-Henri Labourdette, Roger Boileau, 1975

Fonte: < <https://architecture-50.fr/rehabilitation-exemplaire-la-tour-ravel-a-sarcelles-architecture-reconstruction-jacques-henri-labourdette-roger-boileau/> >

Grazie alle **tecnologie digitali, ai materiali innovativi, all'attenzione per l'impatto ambientale** e la cultura della personalizzazione di massa, l'architettura prefabbricata negli ultimi decenni è tornata al centro del dibattito. Le metodologie e gli approcci dell'industrializzazione in architettura hanno permesso una concezione differente della prefabbricazione a livello culturale favorendo la sua accettazione come uno **strumento per progettare** in modo più efficiente e sostenibile. In questo contesto ha trovato spazio per esprimere le sue potenzialità la prefabbricazione con sistemi costruttivi in legno. I **componenti architettonici** come il CLT, i pannelli a telaio o i moduli tridimensionali permettono di realizzare architetture Off-Site altamente performanti, progettati con il software BIM, con processi tracciabili, montaggi rapidi e con precisione millimetrica. L'approccio che permette alla prefabbricazione leggera, cioè quella affermata negli ultimi decenni, di differenziarsi dalle sperimentazioni del passato e offrire **applicazioni originali**, prive di ripetizioni formali, geometriche e spaziali è la personalizzazione di massa, anche detta Mass Customization. Questo approccio permette di differenziare le scelte architettoniche all'interno dello stesso progetto e in altri, mantenendo come base di partenza una piattaforma produttiva standardizzata.¹⁸⁸

L'applicazione delle logiche contemporanee ha fatto sì che oggi, le componenti edilizie prefabbricate non sono più solo strutture standardizzate ma **sistemi tecnologici integrati, progettati digitalmente, assemblati a secco, ispezionabili e manutenibili**. La produzione avviene in stabilimenti industriali con tecnologie avanzate come i macchinari a controllo numerico e supportati dalla robotica applicata alla produzione, mentre la logica costruttiva si è orientata dalla "muratura per sovrapposizione" all'"assemblaggio per interfacce"¹⁸⁹. Gli autori del testo "*Robot-Oriented Design*" Thomas Bock e Thomas Linner definiscono la prima logica, muratura per sovrapposizione o **Brick-by-Brick**, come una modalità che ricalca il **processo costruttivo tradizionale**, dove ogni mattone o componenti viene posato in sequenza, generando una costruzione progressiva e continua.

¹⁸⁸ Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating Architecture*. McGraw-Hill.

¹⁸⁹ Bock, T., & Linner, T. (2015). *Robot-Oriented Design: Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction*. Cambridge University Press.

Questa logica implica un **processo altamente sequenziale** in cui ogni elemento viene posato in un ordine predefinito e può essere realizzato principalmente in loco attraverso lavoro manuale con un conseguente minore controllo di qualità e maggiore presenza di errori umani e interferenze dovute al lavoro sul sito. L'assemblaggio per interfacce, definito dagli autori come **assembly-by-interface**, è la logica per cui i componenti progettati e realizzati in fabbrica vengono assemblati in cantiere tramite interfacce prestabilite. In questa logica le conseguenze sono una **costruzione parallela e modulare** tra le lavorazioni svolte in fabbrica e quelle svolte in cantiere così **da ridurre i tempi** aumentando però la qualità del costruito grazie al **controllo del processo** che avviene in fabbrica e garantito dai sistemi CNC e dai processi standardizzati del processo industriale. Il passaggio dalla logica che contraddistingue i sistemi costruttivi tradizionali, muratura per sovrapposizione, ad una logica che contraddistingue i Modern Methods of Construction, assemblaggio per interfacce, segna una **svolta industriale nell'architettura moderna**. L'introduzione di metodologie digitali, in particolare il BIM e le metodologie DfD e DfMA, hanno permesso di progettare l'edificio come un insieme modulare di componenti coordinati e interoperabili, in linea con la svolta industriale portata dai MMC.¹⁹⁰

La possibilità di coniugare **standardizzazione e personalizzazione** è un tratto significativo della prefabbricazione leggera. La personalizzazione è legata alla **flessibilità dei moduli**, alla varietà dei materiali e alla precisione della progettazione che è resa possibile dalla produzione seriale dei componenti e dalla sua capacità di rispondere ad esigenze geometriche, impiantistiche e funzionali. La **Mass Customization** è il processo che permette di personalizzare i prodotti mantenendo un'efficienza produttiva, questo concetto è stato elaborato per descrivere i processi dell'industria automobilistica. La prefabbricazione leggera, a differenza del passato, è fortemente **orientata alla sostenibilità**, sia per la riduzione dell'impatto ambientale del processo edilizio, sia per la possibilità di progettare edifici disassemblabili, integrabili e che permettono una rigenerazione di componenti attraverso

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

la loro sostituzione oppure con l'utilizzo in altri progetti. Questo è dovuto alla concezione dell'edificio come un **modello aperto** che non si esaurisce nella fase realizzativa, ma considera l'intero ciclo di vita dell'edificio, così come i principi della circolarità e la transizione ecologica suggeriscono.¹⁹¹

Il passaggio dalla prefabbricazione pesante a leggera rappresenta un **cambio di paradigma tecnologico e culturale**, che vede nell'industrializzazione processi costruttivi un valore qualitativo, ambientale e sociale.¹⁹² Il cambiamento ha risvolti non solo nei **processi produttivi, costruttivi** e nei sistemi costruttivi, ma anche nella scelta dei **materiali** per applicare l'Off-Site. Tra le varie alternative, il legno, e nello specifico il legno ingegnerizzato, è una scelta sempre più diffusa in quanto le sue caratteristiche intrinseche e la compatibilità con processi produttivi industrializzati vengono **incentivati dalle normative europee e dai programmi attuativi che l'UE** supporta per incentivare una transizione all'economia circolare ed ecologica l'uso di materiali bio-based¹⁹³. L'architettura Off-Site in legno propone applicazioni innovative ed avanzate e risulta uno dei percorsi più innovativi per l'evoluzione e l'applicazione dei MMC, questo grazie alla **leggerezza, le prestazioni tecniche, il ridotto impatto ambientale e compatibilità con la prefabbricazione digitale**.¹⁹⁴

L'industrializzazione in architettura ha quindi subito un'evoluzione nel suo significato, passando da un approccio teorico nel Novecento ad un approccio concreto e applicabile senza compromessi compositivi nel XXI secolo. L'industrializzazione e la prefabbricazione sono ora concepite come una delle **vie di sviluppo più concrete per rispondere alle sfide ambientali, sociali e produttive del nostro tempo**.

191 Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, 710–718.

192 De Laubier, R. et al. (2019). *The Offsite Revolution in Construction*. Boston Consulting Group.

193 European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). *Reusable timber panels for safe and sustainable buildings (REUSE)*.

194 Digital Innovations in Wooden Construction for a Circular Economy. (2025). *Circular Economy and Sustainability*.

3.2 IMPATTI SULLA FILIERA: PROGETTAZIONE, PRODUZIONE, IMPIANTISTICA E CONNESSIONI

Le **ricadute sistemiche** che l'utilizzo del legno ingegnerizzato come materiale per la realizzazione di architetture prefabbricate leggere e Off-Site interessano l'intero settore delle costruzioni lungo tutta la **filiera edilizia**. Le trasformazioni che interessano il processo edilizio per rendere attuabile l'applicazione dei concetti di prefabbricazione leggera nei progetti architettonici interessano le fasi relative alla **progettazione**, la **produzione**, la **logistica**, il **lavoro in cantiere** e la **manutenzione dell'edificio**. Risulta necessario analizzare come l'architettura Off-Site influenzi in modo diretto le modalità con cui si **concepiscono, realizzano e gestiscono** gli edifici per comprendere pienamente il potenziale e la portata di questa trasformazione. I temi inerenti alla **modellazione digitale avanzata**, la **prefabbricazione in stabilimento**, la **coordinazione impiantistica**, la **progettazione delle connessioni**, comportano ripercussioni **operative e pratiche** che devono seguire i principi di efficienza integrazione e anticipazione. È proprio questo riassetto operativo della filiera edilizia che consente all'Off-Site di proporsi non solo come una strategia tecnica alternativa ma come un **nuovo paradigma di produzione architettonica**. Il cambiamento comportato da questi modelli costruttivi non si limita solamente alle tecniche costruttive ma determina una **trasformazione radicale della filiera edilizia**. Dalla progettazione alla logistica, dalla produzione degli elementi al loro assemblaggio in cantiere, è necessaria una **riconfigurazione sistemica** che ridefinisce ruoli, competenze, strumenti e tempi in ottica di una **filiera integrata**, più vicina alla produzione industriale che ai sistemi tradizionali del settore delle costruzioni, frammentato e poco efficiente.¹⁹⁵

¹⁹⁵ Smith, R. E. (2010). Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction. Wiley.

Il **primo fattore di cambiamento** dovuto all'approccio Off-Site riguarda la **fase progettuale**, che assume un ruolo strategico e anticipato rispetto agli approcci tradizionali. Nei sistemi costruttivi tradizionali, la fase progettuale, prevede che le scelte vengano prese nella fase esecutiva o direttamente in cantiere mentre, i sistemi costruttivi prefabbricati richiedono che **ogni decisione progettuale e realizzativa venga presa a monte**, questo perché una volta avviata la produzione dei componenti in stabilimento non sono possibili modifiche sostanziali dei componenti. La progettazione architettonica si trasforma quindi in un **processo collaborativo e digitale**, basato su strumenti come il **BIM**, che consente la condivisione delle informazioni tra le varie figure professionali che partecipano al progetto, e permette la realizzazione di un **Gemello Digitale**, o Digital Twins, dell'edificio, in cui ogni componente edilizio, elemento strutturale, componente impiantistico o finitura, viene **coordinato, verificato e simulato**, riducendo il rischio di interferenze e incongruenze in fase realizzativa.¹⁹⁶ Questo approccio ribalta il paradigma tradizionale in cui il progetto architettonico evolve in modo lineare e spesso parziale, ovvero sviluppato per fasi successive e senza un'integrazione anticipata dei sottosistemi edilizi.

In molti casi, scelte cruciali vengono rimandate o delegate a fasi esecutive, generando progetti iniziali frammentari e soggetti a continue revisioni. I modelli costruttivi che si basano sulle logiche Off-Site vedono la progettazione come il momento centrale e strategico dell'intero processo costruttivo. Questo ruolo è motivato dalla rilevanza delle decisioni prese in quanto, la progettazione, segue una metodologia DfD e DfMA che impone la progettazione di componenti in funzione della loro realizzabilità, trasportabilità e assemblaggio. L'architetto che segue queste metodologie non si limita a progettare spazi, ma anche interfacce tecniche, sequenze di assemblaggio, tolleranze dimensionali e logiche produttive, il che porta il progetto architettonico ad assumere una valenza doppia. Da un lato definisce la qualità dello spazio abitato, dall'altro deve garantire la compatibilità del progetto con la logica industriale mantenendo una coerenza architettonica ed estetica.

¹⁹⁶ Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – Literature review and future needs. Automation in Construction, 38, 109–127.

La mia esperienza presso l'azienda WolfHaus mi ha permesso di sperimentare quali sono le ripercussioni per un architetto che si inserisce nella filiera edilizia di un edificio prefabbricato con sistemi costruttivi lignei. L'azienda si occupa della realizzazione di edifici, principalmente residenziali, con sistemi costruttivi prefabbricati utilizzando pannelli a telaio in legno e pannelli di CLT. La progettazione segue **processi collaudati e standardizzati** che permettono una **cooperazione tra l'azienda e il progettista** che propone il progetto. Il progetto, una volta entrato nel **flusso di lavoro**, viene tradotto in un file BIM in cui i componenti prodotti dall'azienda sono codificati e le accortezze tecniche sono definite. Questi aspetti permettono di **ridurre le tempistiche di progettazione** in quanto le problematiche che possono insorgere nella progettazione, come connessioni tra elementi, giunture tra gli elementi delle stratigrafie e i pacchetti Wolfhaus, sono classificate e per la risoluzione si segue un **protocollo progettuale chiaro e definito**. Una volta tradotto con le tecniche costruttive applicate dall'azienda, il Digital Twin prodotto con i software BIM, permette la **collaborazione tra i vari settori dell'ufficio tecnico**. Il settore responsabile dei disegni esecutivi si confronta con l'ufficio incaricato dei calcoli strutturale e infine con i progettisti incaricati dei sistemi impiantistici per la coordinazione di tutte le caratteristiche del progetto e per dimensionare e dotare l'edificio di ogni componente necessario richiesto dal cliente. Dopo di che, il file BIM passa all'ufficio incaricato dei disegni per la produzione e degli ordini dei componenti necessari. La definizione dei dati necessari per le macchine CNC vede la realizzazione delle componenti prefabbricate con i sistema industrializzati e standardizzati dell'azienda.

La progettazione risulta quindi **coordinata tra diversi settori** per prevenire errori e garantire la **personalizzazione** di ogni edificio attraverso un **sistema costruttivo protocollato** e definito per soddisfare ogni esigenza progettuale.

Processi Lean-Oriented

Nati in Giappone negli anni '50 si fondano sull'eliminazione degli sprechi, sul miglioramento continuo e sul coinvolgimento di tutta la filiera produttiva. In architettura questi principi consentono di ottimizzare risorse, tempi, migliorare la qualità dei componenti ed integrare in maniera efficiente progettazione, produzione e montaggio.

Produzione Pull-System

Concetto nato in Giappone negli anni '50 come risposta all'esigenza di ridurre gli sprechi e la sovrapproduzione. Si basa sul principio della produzione attivata dalla domanda effettiva, in opposizione al sistema Push System. Nel settore delle costruzioni permette di coordinare la produzione dei componenti edilizi solo quando realmente necessari, riducendo i tempi e costi per lo stoccaggio.

Produzione Pull-System

Concetto nato in Giappone negli anni '70 per ridurre le scorte e i tempi di attesa, producendo e consegnando solo ciò che necessario in termini di quantità e tempi. Questo approccio in architettura consente di coordinare in modo puntuale la produzione dei componenti e il loro assemblaggio in cantiere per evitare sprechi, ridurre i costi e i tempi di realizzazione.

Il secondo fattore di cambiamento si registra nella **fase produttiva**, la quale presenta un cambiamento concettuale e operativo dovuto allo spostamento dal cantiere allo stabilimento. Lo spostamento in stabilimento, un ambiente controllato e protetto dalle variabili climatiche permette di realizzare componenti edilizi con **precisione industriale** con l'utilizzo di macchinari a controllo numerico, CNC, linee automatizzate e processi **Lean-Oriented**.¹⁹⁷ Questi processi derivano dalla filosofia della Lean Production, sviluppata nel settore automobilistico dell'azienda Toyota, e mirano all'eliminazione degli sprechi lungo tutta la filiera produttiva. L'approccio lean si basa su alcuni principi fondamentali come il miglioramento continuo, il coinvolgimento di tutti gli attori del processo, la produzione **Pull System**, la riduzione delle attività che non generano valore, la standardizzazione delle operazioni e la massima efficienza logistica. L'obiettivo non è solo produrre di più ma **generare valore** per il cliente **con il minimo dispendio di risorse materiali**, temporali, umane ed economiche. Risulta chiaro come questi principi, applicati ai processi edilizi, pongano una **trasformazione radicale per un settore** caratterizzato per la sua frammentazione, e la sua bassa produttività. Le implicazioni sul settore possono essere la progettazione anticipata, la produzione **Just-In-Time** di componenti prefabbricati, la riduzione degli scarti dalle lavorazioni, il coordinamento fluido tra tutti gli attori e l'ottimizzazione logistica dell'assemblaggio in sito. La standardizzazione di **elementi modulari** unita alla **digitalizzazione delle informazioni** progettuali consente un'elevata qualità esecutiva, la ripetibilità dei processi, la riduzione degli errori e degli scarti, raggiungendo gli obiettivi posti **dall'ottica lean-oriented**. Il sistema produttivo si ispira a logiche just-in-time, in cui ogni componente viene **fabbricato, trasportato ed assemblato** secondo un flusso coordinato e sincronizzato, riducendo i tempi di giacenza e gli spazi di stoccaggio, sia in fabbrica che in cantiere. Questo tipo di organizzazione è resa possibile dalla digitalizzazione della logistica e dal monitoraggio costante dei flussi informativi tra progettazione e produzione.¹⁹⁸

¹⁹⁷ Gibb, A. G. F. (1999). Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation. Wiley-Blackwell.

¹⁹⁸ Smith, R. E., & Quale, J. D. (2017). Offsite Architecture: Constructing the Future. Routledge.

L'**integrazione impiantistica** è il terzo fattore di cambiamento. Che sia essa relativa ad impianti elettrici, idraulici o di climatizzazione, nei componenti prefabbricati è uno degli aspetti più innovativi e critici per la concezione di architetture Off-Site. I sistemi impiantistici vengono **installati in stabilimento** e questo comporta che devono essere previsti gli spazi tecnici in cui poterli posizionare, in quanto sono preassemblati nei moduli, nei pannelli o in unità tecniche dedicate seguendo le logiche del **Plug-and-Play**. La predisposizione impiantistica all'interno dei componenti prefabbricati comporta la necessità di una **forte sinergia progettuale** tra architetti ed ingegneri impiantistici fin dalle prime fasi di progetto e dalla definizione delle necessità impiantistiche date dalla tipologia edilizia. Le scelte compositive e distributive devono essere compatibili con le logiche di prefabbricazione e manutenzione degli impianti, portando ad una **progettazione più integrata** e orientata alla **manutenibilità futura**.¹⁹⁹ I bagni modulari prefabbricati sono esempi emblematici dell'integrazione impiantistica nei moduli 3D, come le facciate attrezzate, i solai con l'integrazione di impianti elettrici o di climatizzazione lo sono per i componenti 2D. Questi componenti arrivano in sito di cantiere assemblati, collaudati e pronti per l'installazione, questo comporta una riduzione significativa dei tempi di allacciamento e i rischi di errore umano.²⁰⁰

Infine, le connessioni tra i diversi elementi costituiscono una delle componenti chiave per il successo dell'architettura Off-Site. Esse devono garantire resistenza strutturale, impermeabilità, prestazioni acustiche e termiche, ma anche semplicità e velocità di montaggio. Le connessioni diventano di fatto il **punto critico** su cui si gioca l'interfaccia tra produzione e cantiere.²⁰¹ Progettare per il montaggio a secco significa anche progettare per il disassemblaggio, e seguendo quindi i principi del DfD, Design for Disassembly, approccio legato all'economia circolare, consente la riutilizzabilità dei componenti, il recupero selettivo dei materiali a fine vita e la possibilità di aggiornare gli edifici nel tempo.²⁰²

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

200 Ibidem

201 Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Bergin, R. (2012). Application of modular construction in high-rise buildings. Journal of Architectural Engineering,

202 Durmisevic, E. (2006). Transformable Building Structures: Design for Disassembly as a Way to Introduce Sustainable Engineering to Building Design and Construction. PhD Dissertation, TU Delft.

Logiche Plug-and-Play

Concetto che arriva dal settore informatico per indicare componenti immediatamente funzionanti, che non richiedono configurazioni complesse. In architettura indicano sistemi costruttivi modulari progettati per essere assemblati o disassemblati con relativa semplicità per favorire flessibilità, rapidità di assemblaggio e applicazione di principi circolari.



Connessione ad incastro realizzata grazie alla precisione con macchinari CNC

Tamedia Office Building, Shigeruban, 2013

Fonte: <https://www.infobuild.it/progetti/tamedia-office-shigeru-ban/>

Queste strategie sono particolarmente rilevanti nell'ambito della progettazione sostenibile, e costituiscono una risposta concreta alle disposizioni europee in materia LCT e riduzione dell'impatto ambientale degli edifici.

L'analisi degli impatti dell'architettura off-site sulla filiera edilizia ha messo in luce come questo approccio sia in grado di riorganizzare profondamente le modalità operative del settore delle costruzioni, favorendo processi più efficienti, digitalizzati e integrati. Tuttavia, **l'efficienza tecnica e produttiva** non rappresenta l'unico vantaggio del modello Off-Site. Il suo valore strategico si manifesta appieno quando viene messo in **relazione** con gli obiettivi climatici e di sostenibilità che oggi orientano le politiche europee e le agende ambientali internazionali. La possibilità di ridurre l'impatto ambientale degli edifici, di ottimizzare l'uso delle risorse e di favorire pratiche circolari rende l'architettura off-site una **leva fondamentale** per affrontare le sfide climatiche e guidare la **transizione ecologica dell'ambiente costruito**. È a partire da questa prospettiva che risulta necessario approfondire il contributo in architettura off-site alla decarbonizzazione del settore edilizio, analizzandone le ricadute ambientali lungo tutto il ciclo di vita e il suo ruolo nell'attuazione degli obiettivi europei di sostenibilità.

3.3 PROGETTO ARCHITETTONICO E PRODUZIONE INDUSTRIALIZZATA: PROCESSI PRODUTTIVI E LEAN CONSTRUCTION



Stabilimento produttivo Wolf Haus Italia. Nell'immagine si vede la produzione delle pareti a telaio prodotte dall'azienda attraverso un processo industrializzato, tra i più tecnologici in Italia.

Fonte: Sito web Wolf Haus Italia

Roger-Bruno Richard, nel testo *Offsite Architecture* propone una lettura dei sistemi costruttivi prefabbricati in funzione al **grado di lavoro** trasferito dal cantiere allo stabilimento e secondo questa visione, il passaggio elementi monodimensionali a tridimensionali rappresenta una progressiva **estensione del controllo industriale** sul processo edilizio.²⁰³ Secondo questa logica, maggiore è la **complessità del componente** minore sarà **l'attività in sito** e la flessibilità progettuale, ma il costo iniziale sarà maggiore come anche un alto livello di **progettazione integrata**. Al contrario, minore è la complessità del componente, quindi elementi monodimensionali o bidimensionali, minore sarà il costo iniziale con una flessibilità progettuale maggiore, ma questo comporta che l'attività in sito sarà maggiore. Questo comporta che in progetti di architettura Off-Site il ruolo dell'architetto abbia una ridefinizione. Il professionista è chiamato, oltre ad essere **l'autore a livello compositivo** della progettazione spaziale e stilistica dell'architettura, anche il **coordinatore del sistema costruttivo**, incaricato di prendere decisioni coerenti con le logiche produttive, logistiche ed economiche dell'intervento.²⁰⁴

Nella pratica architettonica contemporanea, la distinzione tra elementi 1D, 2D e 3D non è rigida ma spesso combinata. Molti edifici prefabbricati utilizzano una **logica ibrida**, in cui la struttura primaria è realizzata con componenti monodimensionali, come travi e pilastri in GLT, le partizioni e le chiusure con pannelli 2D, come pareti in CLT o a telaio, e alcuni spazi sono realizzati con moduli 3D, come sistemi distributivi o locali tecnici. Questa combinazione permette di bilanciare **efficienza produttiva e flessibilità architettonica**, dimostrando come l'industrializzazione, attraverso la combinazione di componenti, pur entro i limiti imposti dalle logiche industriali, può rappresentare un'**opportunità progettuale** per realizzare architetture con alte prestazioni, con un ridotto impatto ambientale e accorciando i tempi di realizzazione.²⁰⁵

203 Richard, R. B. (2017). "Categorization of Industrialized Building Systems." In Smith, R. E., & Quale, J. D. (Eds.), *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge.

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

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

L'analisi dei sistemi costruttivi aperti, chiusi e ibridi fatta nel capitolo 1.5 "*Il ruolo dell'industrializzazione nei sistemi costruttivi prefabbricati leggeri*" ci permette di osservare come l'industrializzazione architettonica non riguardi soltanto i materiali e le tecnologie, ma coinvolga in profondità **l'intera filiera edilizia** e il **modello organizzativo e progettuale**. In questo senso, appare evidente che per affrontare in modo coerente ed integrato le sfide dalla prefabbricazione contemporanea è necessario adottare una logica produttiva capace di ottimizzare flussi, ridurre gli sprechi e valorizzare la qualità. Uno strumento operativo che permette di rendere concrete queste premesse è l'approccio che si basa sui principi della **Lean Production**, un modello nato nell'industria automobilistica che ha trovato nel settore delle costruzioni, e in particolare nelle strategie Off-Site, un terreno fertile per la sperimentazione e l'innovazione. Il concetto di **Lean Construction** rappresenta oggi uno degli strumenti più promettenti per rendere il processo edilizio più efficiente, collaborativo e sostenibile.

Il concetto di Lean Production, sviluppato dagli studi sul Toyota Production System negli anni Ottanta, nasce dall'osservazione dell'**efficienza produttiva dell'industria automobilistica** giapponese basata sui principi di riduzione degli sprechi, il miglioramento continuo, il controllo della qualità integrato e il coinvolgimento attivo degli operai. A differenza del modello fordista, incentrato sulla produzione di massa e sulla standardizzazione rigida, la Lean Production promuove un'organizzazione **snella e adattabile, orientata alla domanda** e capace di rispondere in modo flessibile ai cambiamenti del mercato.²⁰⁶

206 Pannell, R. (2024, Marzo 11). *Optimizing efficiency: Inside the Toyota Production System*. LeanScape. Ultima consultazione 26 Agosto 2025, < <https://leanscape.io/optimizing-efficiency-inside-the-toyota-production-system/> >

Il passaggio dal settore manifatturiero a quello edilizio è avvenuto con il concetto di **Lean Construction**, teorizzato dagli studiosi *Glenn Ballard e Greg Howell*, che a partire dagli anni Novanta hanno cercato di trasferire i principi Lean nel mondo delle costruzioni. La Lean Construction non è una semplice tecnica di gestione del cantiere, ma un **modello sistemico** che coinvolge tutte le fasi del processo edilizio, dalla progettazione alla produzione Off-Site, fino alla logistica e all'assemblaggio. Il suo obiettivo è quello di **massimizzare il valore per il committente riducendo le inefficienze** lungo la filiera del progetto.²⁰⁷

Nel contesto dell'architettura Off-Site e in particolar modo quando si utilizzano componenti architettoniche in legno ingegnerizzato, i principi Lean trovano una naturale applicazione. La produzione in stabilimento, infatti, permette un maggiore controllo sui tempi, sulla qualità e sull'impiego delle risorse. L'impiego di macchine a controllo numerico, sistemi digitali di progettazione e flussi informativi coordinati tra progettisti, produttori e installatori, consente una **pianificazione precisa delle attività** riducendo i tempi morti e gli errori di montaggio.²⁰⁸

Uno degli strumenti più efficaci per applicare la Lean Construction in ambito edilizio è il **Last Planner System**, una metodologia di gestione della produzione che si basa sulla pianificazione collaborativa tra tutti i soggetti coinvolti nel progetto. Ogni fase viene pianificata dal "last planner", ovvero l'operatore che esegue fisicamente il lavoro, garantendo così una maggiore affidabilità e aderenza alla realtà di cantiere. Nei processi industrializzati nel quale si inseriscono le strategie Off-Site, questo approccio permette di **coordinare con precisione le fasi produttive**, sincronizzando la produzione in stabilimento con le operazioni di montaggio in sito.²⁰⁹

207 Ballard, G., & Howell, G. (1998). "What kind of production is construction?" *Proceedings of the 6th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*.

208 Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction*. McGraw-Hill.

209 Mossman, A. (2009). "Why isn't the UK construction industry going lean with gusto?" *Lean Construction Journal*, October 2009.

La trasposizione dei modelli lean del settore automobilistico a quello edilizio non è priva di difficoltà. La **singularità del prodotto architettonico**, la sua dipendenza dal contesto e la varietà delle normative rendono impossibile una **standardizzazione totale dell'architettura**. Il cantiere resta un luogo complesso e soggetto a variabili difficilmente controllabili, ma questa complessità può essere affrontata seguendo i principi della Lean Construction che stimola la possibilità di adattamento e **miglioramento continuo**.²¹⁰ Il modello Lean, se applicato con intelligenza e sensibilità progettuale, può rappresentare una risorsa strategica per l'architettura Off-Site, permettendo di **coniugare efficienza e qualità, sostenibilità e innovazione**. Lontano dall'idea di una costruzione standardizzata e impersonale, la Lean Construction offre una prospettiva nella quale l'industrializzazione non è la fine del progetto ma un suo potenziamento.

L'applicazione dei principi della Lean Construction evidenzia come sia importante ottimizzare non solo il processo produttivo della singola azienda ma che sia importante anche la collaborazione lungo l'intera filiera produttiva. L'efficienza di un sistema costruttivo industrializzato dipende infatti dalla capacità di orchestrare in modo coordinato progettisti, produttori, addetti alla logistica, professionisti addetti all'assemblaggio e i fornitori. Il concetto di filiera non è un elemento secondario, diventa parte integrante della strategia architettonica e produttiva, comprendere come funziona la catena del valore della prefabbricazione in legno ingegnerizzato, dalla materia prima alla consegna dell'edificio finito, è essenziale per leggere le potenzialità e i limiti dell'industrializzazione edilizia. Il modello dei fornitori mutato dall'industria manifatturiera offre una chiave di lettura utile anche nel settore delle costruzioni.

210 Koskela, L. (2000). *An Exploration Towards a Production Theory and its Application to Construction*. VTT Technical Research Centre of Finland.

Nel settore dell'architettura, in particolare per quanto riguarda i sistemi costruttivi prefabbricati in legno, la struttura della filiera produttiva **incide** profondamente sulle **scelte progettuali, sui costi, sulla qualità del prodotto e sulla sostenibilità dell'intervento**. A differenza dell'edilizia tradizionale, in cui gran parte della costruzione avviene in cantiere e coinvolge una moltitudine di maestranze locali, la prefabbricazione off-site si basa su una **catena organizzata** di autori specializzati, ciascuno dei quali fornisce una parte del sistema costruttivo, rispettando standard, tempi e costi definiti.

Il **modello Tier**, ampiamente utilizzato in ambito industriale e in particolar modo nel settore dell'automotive è utile per comprendere la **classificazione dei fornitori** della filiera produttiva, anche quella del settore delle costruzioni prefabbricate in legno. Proiettando il modello Tier su un ipotetica filiera che contribuisce alla realizzazione di un'architettura prefabbricata in legno ingegnerizzato potremmo assumere che, i fornitori **Tier 1** sono coloro che **forniscono direttamente l'azienda produttrice** dell'edificio prefabbricato, ad esempio pannelli CLT, sistemi di connessione, impianti meccanici integrati, serramenti. I **Tier 2** sono i **fornitori di materie prime o semilavorati** che riforniscono i Tier 1 e questi possono essere aziende forestali che forniscono tavole di legno lamellare, produttori di colle strutturali, forni specializzati nella prefabbricazione di giunti o staffe.²¹¹

Questo modello a livelli consente di comprendere la **complessità della produzione architettonica** e il grado di dipendenza del progetto dalle specificità dei componenti forniti. Nell'edilizia tradizionale molti dettagli possono essere definiti in cantiere, la scelta dei componenti utilizzati nella realizzazione non influenza in modo significativo la progettazione, nella prefabbricazione Off-Site molte scelte architettoniche sono condizionate, e in alcuni casi determinate, **dalla disponibilità e della compatibilità** dei componenti forniti. Il disegno architettonico diventa così una composizione su un **vocabolario industriale**, da cui si riconosce l'abilità del progettista nel riuscire a combinare elementi standardizzati in soluzioni personalizzate, mantenendo coerenza tra forma, tecnica e logistica.²¹²

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

212 Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction*. McGraw-Hill.

Le ricadute progettuali in un processo produttivo per la realizzazione di sistemi costruttivi in legno prefabbricato sono particolarmente accentuate. Durante il mio tirocinio curriculare presso l'azienda WolfHaus, ho potuto osservare come la progettazione definitiva condotta dall'azienda rispetto a progetti realizzati da professionisti esterni, clienti dell'azienda, sia fortemente **influenzata dalle tecnologie e dai sistemi costruttivi stessi** ma anche dai fornitori. Prendendo come esempio un'azienda come WolfHaus Italia, essa non produce internamente pannelli CLT, quindi potrebbe acquistarli da fornitori esterni, che possono essere aziende come Stora Enso o Binderholz²¹³. Questi fornitori, a loro volta, possono essere produttori di legname e trasformatori di esso in legno ingegnerizzato, in questo caso CLT, oppure essere riforniti da Tier 2, che forniscono il materiale garantendo che esso proviene da filiere forestali certificate, lavorato con macchinari industriali e ne garantiscono le prestazioni secondo gli standard normativi europei. Il progetto architettonico sviluppato in questo ipotetico contesto deve rispettare il **modulo dei pannelli, le dimensioni dei giunti, i limiti di trasporto e di montaggio**. Non si tratta di limitazioni ma di condizioni operative che richiedono una progettazione consapevole e integrata.²¹⁴

L'approccio progettuale ha come conseguenze, da un lato, la **standardizzazione dei componenti**, favorendo l'affidabilità, la qualità costruttiva e la riduzione dei costi, i componenti prefabbricati vengono testati, certificati, ottimizzati, e possono essere integrati nei modelli BIM in modo funzionale alla progettazione, favorendo la produzione di un modello digitale. Dall'altro lato, questa logica richiede all'architetto incaricato del progetto di **rinunciare all'idea dell'invenzione formale** autonoma e lo porta ad allinearsi a un approccio progettuale che lo incoraggia ad utilizzare una biblioteca di componenti compatibili con il sistema costruttivo e produttivo, in modo da configurare il progetto secondo le regole implicite della filiera produttiva.²¹⁵

213 Queste aziende sono esempi possibili di fornitori di pannelli in CLT, l'elaborato di tesi non ha il fine di indagare la filiera e la catena di rifornimento dell'azienda WolfHaus Italia.

214 Gibb, A. G. F. (1999). *Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation*. Wiley-Blackwell.

215 Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling*. Wiley.

Le architetture Off-Site in legno industrializzato presentano una filiera che non è solamente verticale, dai fornitori al produttore, ma spesso essa può essere **trasversale**. Alcune aziende di grandi dimensioni, come Stora Enso, non si limitano a fornire materiali, ma **partecipano attivamente allo sviluppo di soluzioni progettuali** offrendo servizi di ingegneria e collaborando con studi di architettura. Questo modello integrato, simile a quello delle “*big company*” del settore automotive, come Toyota o Stellantis, permette una maggiore coerenza tra progetto e produzione, ma può anche ridurre la varietà delle soluzioni architettoniche possibili.

La filiera e la sua struttura hanno un importante impatto sulla sostenibilità ambientale del progetto. La **tracciabilità dei materiali, la certificazione della provenienza, la logistica ottimizzata e il controllo dei rifiuti di produzione**, sono tutti elementi che impattano sulla sostenibilità del progetto e sul lavoro che l'azienda compie. L'organizzazione della filiera è una parte integrante delle strategie di sostenibilità di un'architettura prefabbricata, in special modo se si utilizzano materiali bio-based o provenienti da processi circolari. Non basta scegliere un materiale ecologico, occorre **garantire che il suo ciclo produttivo** sia coerente con gli obiettivi ambientali dell'intervento. Comprendere il ruolo dei fornitori e della struttura della filiera è quindi essenziale per operare in modo consapevole nel campo dell'architettura industrializzata e il progettista che si interfaccia con essa deve essere consapevole del fatto che lavora con reti di produzione, piattaforme logistiche e componenti tecnologici che forniscono i limiti e le potenzialità del costruire.²¹⁶

²¹⁶ Smith, R. E., & Quale, J. D. (2017). Offsite Architecture: Constructing the Future. Routledge.

3.4 LA SCALA DI PROGETTO E IL RUOLO DEL PROGETTISTA IN UN PROGETTO DI ARCHITETTURA OFF-SITE

Dallo studio della filiera produttiva e della logica dei fornitori nei sistemi industrializzati in legno emerge chiaramente come l'architettura Off-Site sia un **processo collettivo e articolato**, dove il progetto architettonico si intreccia con **dinamiche industriali, logistiche e organizzative complesse**. Accanto a questi aspetti sistemici, emerge un ulteriore tema trasversale e cruciale come la **scala dell'industrializzazione**. La prefabbricazione dei sistemi costruttivi, oltre ad interessare la natura dei materiali o la configurazione dei componenti, si declina in funzione della **dimensione dell'edificio**, della **complessità costruttiva** e del **grado di integrazione tecnologica**. Per comprendere i limiti, le potenzialità e le strategie più adatte per la realizzazione di un determinato edificio applicando le strategie Off-site è necessario comprendere come cambia l'industrializzazione al variare della scala del prodotto architettonico.

La questione della scala apre a quesiti come a che livello progettuale si applica l'industrializzazione in architettura e qual è il soggetto della stessa, i materiali, i componenti, i sottosistemi o l'edificio nel suo insieme. La risposta non è univoca date le ampie possibilità in cui la prefabbricazione si declina. Se si analizzano queste possibilità iniziando dalla possibilità meno complessa, si può affrontare l'industrializzazione dei **componenti primari**, come travi, pilastri, pannelli o moduli impiantistici. Questi elementi possono essere standardizzati e replicabili e costituiscono **la base della logica costruttiva industrializzata**. Questi prodotti sono progettati per essere facilmente integrati in una varietà di configurazioni architettoniche e sono caratterizzati da un'alta precisione grazie alla produzione in stabilimento e successivamente vengono **testati secondo normative tecniche**.²¹⁷ Questi componenti, per mantenere l'efficienza garantita dall'industrializzazione, devono essere inseriti in una progettazione consapevole che non comporti modifiche in cantiere in quanto questo vanificherebbe il lavoro di prefabbricazione.

217 Gibb, A. G. F. (1999). *Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation*. Wiley-Blackwell.

Aumentando la complessità del componente, passiamo ad esaminare l'industrializzazione relativa ai **sottosistemi edilizi** come pareti, coperture, nuclei impiantistici o moduli funzionali. Per questi componenti è necessario una prefabbricazione che prevede un **assemblaggio in stabilimento** per costituire una unità funzionale coerente, pronta per essere integrata nel sistema edificio. Dal punto di vista architettonico, questa scala consente di mantenere un grado di personalizzazione e adattamento alle esigenze progettuali beneficiando della qualità e del controllo offerti dalla produzione industriale.²¹⁸

La produzione di edifici modulari composti da **cellule tridimensionali** che includono struttura, involucro, impianti e forniture, rappresenta un **alto grado di industrializzazione**. Questa scala di prefabbricazione rappresenta il livello più vicino al concetto di prodotto industriale finito, simile a quanto avviene nell'industria automobilistica o navale. Il passaggio dalla produzione di componenti alla produzione di edifici interi comporta **sfide rilevanti** come il trasporto, le normative edilizie locali, i limiti di peso e dimensione per la movimentazione in cantiere, esigenze di fondazioni e di adattamento al sito.²¹⁹ L'adozione di sistemi prefabbricati realizzati con moduli tridimensionali è spesso limitata a tipologie di progetti a grandi scale o di interventi temporanei, come residenze per studenti, hotel o housing emergenziale.

L'importanza di questa riflessione è comprendere che **non esiste una scala ideale o migliore di industrializzazione**, ma piuttosto una gamma di possibilità che devono essere valutate in funzione degli obiettivi progettuali, delle condizioni di contorno, delle capacità progettuali e produttive dell'azienda e alle risorse tecnologiche ed economiche disponibili. L'industrializzazione completa di un edificio non è sempre la soluzione più vantaggiosa, in molti casi la strategia migliore è **adottare una strategia che contempli l'unione di più soluzioni** differenti con un diverso livello di industrializzazione secondo una logica ibrida e adattiva.²²⁰

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

219 Kamali, M., & Hewage, K. (2016). "Life cycle performance of modular buildings: A critical review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1171–1183.

220 Lessing, J. (2006). "Industrialised house-building – Concept and processes." *Licentiate Thesis*, Lund University.

Per quanto riguarda le aziende del settore, la **scala di industrializzazione** dei componenti determina il tipo di **investimento necessario** per realizzare una linea produttiva e quindi l'investimento richiesto per entrare nel settore. La produzione di componenti monodimensionali o bidimensionali richiede impianti relativamente flessibili e investimenti contenuti, accessibili a livello economico da realtà medio-piccole. Per quanto riguarda l'allestimento di una linea produttiva per la realizzazione di moduli 3d richiede **impianti industriali di grandi dimensioni, macchinari avanzati, una logistica integrata e un capitale elevato**, sostenibili grandi realtà.²²¹ Questo aspetto crea una segmentazione del mercato della prefabbricazione, in cui coesistono operatori di diverse dimensioni, ciascuno specializzato in una scala di prodotto diversa.

Al crescere dalla scala di prefabbricazione cresce anche la necessità di **standardizzazione progettuale** e questo è un fattore rilevante per quanto riguarda la progettazione e la scelta del sistema costruttivo prefabbricato. Un elemento monodimensionale può essere **facilmente adattato a differenti progetti**, un modulo abitativo tridimensionale è concepito con specifiche tecniche proprie di un solo progetto. Questo vincolo pone la necessità di comprendere come la scelta di un sistema sia strettamente legata alla concezione architettonica e alla tipologia di progetto.²²² Il **supporto delle politiche e dei programmi**, unito ai vantaggi oggettivi di questi sistemi costruttivi sono condizioni necessarie ma non sufficienti. Affinché l'industrializzazione possa affermarsi nel mercato e con essa la diffusione delle strategie Off-Site, e assumere il ruolo di leva di cambiamento sistemico, è necessario un cambiamento anche nelle strategie di accesso al mercato e nelle barriere economiche e logistiche che ostacolano l'evoluzione del settore.



Interno dello stabilimento dedicato alla produzione di moduli abitativi tridimensionali completi, che integrano struttura, involucro e finiture, pronti per il trasporto e l'assemblaggio in cantiere.

Fonte: MDPI, *Modular Construction: modern methods of off-site manufacturing* (2022)

221 Blismas, N., Pendlebury, M., Gibb, A., & Pasquire, C. (2005). "Constraints to the use of off-site production on construction projects." *Architectural Engineering and Design Management*, 1(3), 153–162.

222 Richard, R. B. (2017). "Categorization of Industrialized Building Systems." In Smith, R. E., & Quale, J. D. (Eds.), *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge.

Il tema della scala dell'industrializzazione si lega direttamente al lavoro che il progettista è chiamato a sostenere quando sceglie di applicare logiche Off-Site. La **progressiva complessità** dei livelli di prefabbricazione, dal componente monodimensionale ai sistemi tridimensionale, determina infatti il **grado di libertà progettuale** e la **natura delle scelte architettoniche**. I sistemi costruttivi monodimensionali permettono all'architetto un'ampia libertà progettuale, al contrario maggiore è la complessità dei componenti, maggiore è la necessità di rispondere ad esigenze progettuali insite nel sistema costruttivo.²²³

Per gestire la crescente complessità dei sistemi costruttivi, il disegno architettonico assume il ruolo di processo di mediazione tra i **vincoli industriali e gli obiettivi progettuali**. L'abilità del progettista risiede nella capacità di "*comporre un vocabolario industriale*" fatto di **componenti standardizzate** tra cui trovare le **soluzioni architettoniche** che gli permettono di tradurre la sua idea architettonica in un'architettura con coerenza tra forma, tecnica e logistica. Questo approccio progettuale dato dal modello costruttivo non implica che la libertà progettuale dell'architetto diminuisca con l'aumento dell'industrializzazione, ma cambia di concetto e assume il ruolo di regia del processo e di gestione sistemica delle complessità.²²⁴

La **comprensione della scala dell'industrializzazione** diventa condizione necessaria per valutare l'impatto delle scelte costruttive del progetto e per comprendere il ruolo dell'architetto nel quadro di una filiera delle costruzioni sempre più industrializzata. L'applicazione nei processi costruttivi di logiche di industrializzazione e digitalizzazione, di metodologie con principi dell'economia circolare e dell'Off-Site, richiedere un differente approccio progettuale da parte degli architetti e progettisti. L'architetto diventa **coordinatore di complessità**, gestore di dati e interprete di processi, agendo in un ecosistema interdisciplinare in cui la qualità architettonica si raggiunge, oltre che per la composizione spaziale ed estetica, anche dalla capacità di generare relazioni efficaci tra il progetto, la produzione, la logistica, l'assemblaggio, il fine vita e la coerenza etica e di approccio progettuale tra le esigenze progettuali e i sistemi costruttivi prefabbricati e la loro industrializzazione.²²⁵

223 Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Goodier, C. I. (2014). *Design in modular construction*. Boca Raton: CRC Press

224 Smith, R. E., & Quale, J. D. (2017). *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge.

225 ArchDaily. (2025, April 15). *Off-Site construction is radically changing the rules*

Storicamente il ruolo dell'architetto è stato definito come **autore di un'opera unica**, capace di tradurre intenzioni culturali in forme architettoniche. Questo ruolo oggi è semplificato, in quanto, in un contesto caratterizzato da prodotti industrializzati, strumenti digitali e modelli collaborativi, questo paradigma non riassume più il ruolo del professionista. L'autorialità dell'architetto viene accostata alla **regia del processo**. In questa nuova dimensione, l'architetto non perde centralità, ma cambia natura, assume il ruolo di colui che orchestra la complessità, gestisce le interfacce tra le discipline coinvolte e **garantisce coerenza e qualità al progetto**.²²⁶ Il BIM, strumento operativo per la progettazione di sistemi costruttivi Off-Site, strettamente necessario per la gestione di complessità geometriche e costruttive, e di informazioni, assume il ruolo di **strumento operativo** con cui la trasformazione del ruolo si concretizza. Il BIM trasforma il disegno in uno spazio informativo **condiviso**, in cui l'architetto opera insieme ad ingegneri, produttori, costruttori e committenti, coordinando flussi di dati, simulazioni, decisioni e verifiche.²²⁷

L'architetto, nel contesto dell'architettura Off-Site in legno, va in contro ad una radicalizzazione di questa trasformazione, in quanto, la prefabbricazione richiede una **anticipazione progettuale** nella quale ogni elemento, nodo, componente deve essere definito prima della produzione. La logica del cantiere come luogo di risoluzione dei problemi viene sostituita da quello dello stabilimento, dove a tolleranza progettuale è minimo e vengono misurate in millimetri.²²⁸ L'architetto, in questo contesto, deve conoscere le **logiche della produzione industriale**, i **limiti delle macchine CNC**, le strategie di assemblaggio dei pannelli CLT o a telaio, i **vincoli di trasporto e montaggio** e le **sequenze costruttive**. Inoltre, deve dialogare con gli operatori addetti alla produzione in stabilimento, tradurre il progetto in codici compatibili con la produzione e allo stesso tempo garantirne la qualità architettonica.

of architectural design. ArchDaily. < <https://www.archdaily.com/971874/off-site-construction-is-radically-changing-the-rules-of-architectural-design> >

²²⁶ Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Taylor & Francis.

²²⁷ Eastman, C. et al. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. Wiley.

²²⁸ Smith, R. E., & Quale, J. D. (2017). *Offsite Architecture: Constructing the Future*. Routledge.

La ridefinizione del ruolo implica anche una **evoluzione delle competenze**. Accanto alla formazione storica, oggi è necessario acquisire **competenze digitali, ambientali, produttive e gestionali**. Al sapere architettonico si aggiunge il sapere integrato, capace di connettere il progetto al contesto, alla fabbrica, all'ambiente e alla società.²²⁹

Al di là della dimensione tecnica, l'architetto conserva la funzione fondamentale di mediatore culturale. In un mondo dominato da standard e logiche produttive, è suo compito difendere la **specificità del luogo**, la **qualità dello spazio**, la dignità del vivere. Anche nell'architettura Off-Site in legno, dove la prefabbricazione impone vincoli formali, l'architetto può e deve **generare senso, proporre soluzioni spaziali innovative, integrare natura, materiali e tecnica in una visione coerente**.

In conclusione, nel nuovo scenario dell'architettura Off-Site in legno, l'architetto non è più solo l'autore della forma, ma un professionista capace di **connettere saperi, anticipare scenari, coordinare attori e orientare processi**. Il progetto non è più una sequenza di disegni, ma un ambiente operativo e relazionale. In questa trasformazione, l'architetto può ritrovare una nuova centralità, fondata non sull'eccezionalità della forma, ma sulla capacità di generare valore attraverso la regia del sistema. Innovazione, sostenibilità e circolarità diventano così competenze progettuali, e non più solo requisiti tecnici. È in questa figura ibrida, colta, digitale e relazionale, che si gioca il futuro della professione.

²²⁹ AIA (American Institute of Architects) (2017). *The Architect's Guide to Integrating Innovation and Practice*.

CONCLUSIONI

In questa tesi, sono stati esplorati i temi relativi all'industrializzazione edilizia e l'innovazione tecnologica nel contesto europeo, analizzando con particolare attenzione l'applicazione dei principi dell'economia circolare nel settore delle costruzioni. La ricerca si è concentrata sulle metodologie relative ai Modern Methods of Construction e all'architettura Off-Site, considerandoli come strumenti attuativi per accompagnare la transizione del settore. La questione legata alla ricerca si inserisce nel tema della questione ambientale come punto iniziale, con l'obiettivo di comprendere come il cambiamento in atto possa ripercuotersi sulle pratiche costruttive, interessando sia il ruolo dell'architetto, sia quello della filiera. L'elaborato cerca di dimostrare come l'integrazione tra modelli circolari e metodologia Off-Site, possano avere un impatto sistemico concreto con la coniugazione dell'industrializzazione edilizia e l'innovazione tecnologica. Le architetture analizzate confermano la validità, per differenti necessità progettuali, dell'architettura Off-Site e dimostrano il raggiungimento di obiettivi non solo a livello ambientale ma anche sociale.

Durante il lavoro di ricerca è risultato chiaro che la transizione verso una decarbonizzazione abbia bisogno di indirizzi politici chiari e vincolanti. Le caratteristiche tecniche e i vantaggi in termini ambientali che l'architettura Off-Site e dei sistemi costruttivi in legno ingegnerizzato offrono non sono sufficienti per la diffusione. In questo quadro sono state presentate le politiche europee come motore per la trasformazione. Gli obiettivi di decarbonizzazione, di riduzione dei rifiuti e dell'impatto ambientale, sono stati definiti dalle istituzioni come traguardo per il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050. Il settore delle costruzioni, settore responsabile del 36% delle emissioni a livello europeo, è stato individuato come area di intervento per poter raggiungere questi obiettivi. Gli strumenti operativi per tradurre questi obiettivi in azioni concrete sono le metodologie MMC, l'Off-Site e l'utilizzo di materiali bio-base. Per la loro applicazione, il Green Deal Europeo, il New European Bauhaus e il Circular Economy Action Plan, sono fondamentali in quanto permettono una diffusione dei valori e la nascita di programmi che incentivano queste strategie.

La ricerca condotta durante la tesi mi ha condotto alla comprensione di come l'industrializzazione dei sistemi costruttivi legata alle metodologie Off-Site comporta un cambiamento di approccio a livello progettuale e produttivo. L'aspetto da cui partire è come gli strumenti digitali, tra cui il BIM e il DfMA, siano applicati al fine facilitare la gestione del progetto e della produzione. È stata fonte di interesse l'aspetto legato ai software BIM come strumento digitale per una gestione del progetto. Per supportare i processi di industrializzazione e i principi di circolarità, il progetto deve racchiudere informazioni per la gestione delle componenti edilizie. Il DfMA rappresenta l'approccio metodologico che mira a semplificare la fabbricazione e ottimizzare l'assemblaggio. Le ricadute teoriche e pratiche di questa trasformazione hanno portato ad applicazioni architettoniche in diversi ambiti e contesti europei, con risultati eterogenei ma accumulati da metodologie e approcci. Questi risultati sono frutto di normative a livello europeo e nazionale che hanno visto la declinazione delle strategie architettoniche relative al social housing con differenti gradi di industrializzazione, di materiali e di scale architettoniche. In questa analisi è stato esposto come i materiali utilizzati per la costruzione risultano fondamentali per poter supportare i processi di circolarità e di decarbonizzazione e per questo motivo, viene individuato il legno ingegnerizzato come soluzione che corrisponde alle necessità. Il legno ingegnerizzato non risulta la sola e unica soluzione ma risulta compresa in differenti programmi e direttive di sviluppo.

La mia ricerca mette in evidenza come questa transizione circolare non sia priva di ostacoli. I limiti che l'industrializzazione incontra nel settore delle costruzioni. Gli strumenti digitali e gli investimenti necessari per poter entrare nel mercato sono ostacoli economici e tecnologici che forniscono ancora un limite per l'applicazione di queste metodologie. I limiti culturali sembrano essere stati superati per quanto riguarda la prefabbricazione, ma sembrano più radicati i pregiudizi inerenti alla scelta di utilizzare sistemi costruttivi in legno. A questo riguardo l'Unione Europea sta attuando strategie, legate alle sue politiche, come il New European Bauhaus, per avviare un processo di cambiamento culturale riguardo queste pratiche e attraverso i programmi nati dal Green Deal Europeo e finanziati da Horizon 2020 e altri programmi di finanziamento, supportare la filiera edilizia ad investire in tecnologie, e conoscenze per concretizzare questa trasformazione.

Il tema dell'industrializzazione e l'applicazione dei principi dell'economia nel settore delle costruzioni risulta essere un tema molto sfaccettato, con molti attori coinvolti e con ricadute sistemiche per tutta la filiera edilizia. L'innovazione tecnologica allo stesso modo risulta essere rapida ed evolversi su differenti livelli, sia per quanto riguarda gli strumenti digitali che per quelli materiali. Queste considerazioni lasciano la porta aperta a sviluppi del settore delle costruzioni sfaccettati ma che si spera vadano in direzione della decarbonizzazione e della sostenibilità ambientale, sociale ed economica, per garantire uno sviluppo che non gravi sulle generazioni future.

BIBLIOGRAFIA

- Barra, A. (2022). *Transizione verso l'economia circolare in ambito europeo: politiche, processi e buone pratiche. Elaborazione di uno scenario progettuale nel contesto territoriale dell'Ecosistema Eco3R in provincia di Torino [Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino].* Archivio Tesi Politecnico di Torino.
- Bertram, n., Fuchs, s., Mischke, j., Palter, r., Strube, g., Woetzel, L., *Modular construction: From projects to products, McKinsey & Company, 2019.*
- Curtis, W. J. R. (2006). *L'architettura moderna dal 1900 (3^a ed.).* Phaidon.
- Daniele Chiarella, Hemant Ahlawat, Jukka Maksimainen, and Sebastian Reiter, 2025 "How circularity can make the built environment more sustainable". *McKinsey & Company*
- Durmisevic, E. (2006). *Transformable Building Structures: Design for Disassembly as a Way to Introduce Sustainable Engineering to Building Design and Construction. PhD Dissertation, TU Delft.*
- Durmisevic, E., de Regel, S., Debacker, W., Michiels, J., & Vanderheyden, J. (2019). *Reversible Building Design: Design Strategies for Reversible Buildings [E-book].* BAMB (Buildings As Material Banks).
- Frampton, K. (2007). *Modern Architecture: A Critical History.* Thames & Hudson.
- Ge, M., & Friedrich, J. (2024). *Climate Watch Country Greenhouse Gas Emissions Data and Methodology.* World Resources Institute.
- Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction.* McGraw-Hill.
- Lessing, J. (2006). *Industrialised House-Building: Concept and Processes. Licentiate Thesis, Lund University.*
- Muratore, F. (2022). *I processi di industrializzazione dell'edilizia prefabbricata. I contesti della sperimentazione [Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino].* Archivio Tesi Politecnico di Torino.
- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). "Circular Economy for the Built Environment: A Research Framework." *Journal of Cleaner Production, 143.*
- Richard, R. B. "Categorization of Industrialized Building Systems." In: Smith, R. E., & Quale, J. D. (2017). *Offsite Architecture: Constructing the Future.* Routledge.
- Smith, R. E. (2010). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction.* Wiley
- Smith, R. E., & Quale, J. D. (2017). *Offsite Architecture: Constructing the Future.* Routledge.
- Tosco, A. (2024). *L'innovazione tecnologica del settore AEC nel contesto del Trentino – Alto Adige. Il processo evolutivo dell'involucro edilizio e il caso studio dell'Hotel La Briosia [Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino].* Archivio Tesi Politecnico di Torino. [Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino]. Archivio Tesi Politecnico di Torino.
-

FONTI CONSULTATE

- Stahel, W. R. (2019). *The Circular Economy: A User's Guide*. Routledge. < https://www.researchgate.net/publication/332935101_The_Circular_Economy_-_a_user's_guide >
- Cramer, J. (2022, marzo). *Building a Circular Future: Ten Takeaways for Global Changemakers* (Amsterdam Economic Board/Holland Circular Hotspot). Amsterdam Economic Board. Documento PDF.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232.
- Akinade, O. O., et al. (2017). “Design for Deconstruction Using BIM Tool.” *Buildings*, 7(4), 95.
- McNeil-Ayuk, N., & Jrade, A. (2024, settembre). Integrating Building Information Modeling (BIM), GIS, and Circular Economy (CE) for the Construction and Deconstruction Waste Based on Construction Methods at the Conceptual Design Stage of Buildings. In *Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference 2023, Volume 4* (pp. 343–356).
- GlobalABC. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. United Nations Environment Programme. Pag. 16
- Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies are Poised to Transform Building Construction*. McGraw-Hill. < <https://gsappworkflow2011.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/09/kieran-refabricating-architecture.pdf> >

- Rios, F. C., Chong, W. K., & Grau, D. (2015). Design for Disassembly and Deconstruction – Challenges and Opportunities. *Procedia Engineering*, 118, 1296–1304. < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815021402>>
- Brand, S. (1994). *How buildings learn: What happens after they're built*. New York: Viking Press.
- Gibb, A. G. F., & Pendlebury, M. (2006). *Modern Methods of Construction in the UK: Agenda for Action*. Buildoffsite Report. < https://www.researchgate.net/publication/237211971_Modern_Methods_of_Construction_in_Housebuilding_Perspectives_and_Practices_of_Leading_UK_Housebuilders >
- UK Ministry of Housing, Communities & Local Government (2019). *Modern Methods of Construction: A Definition Framework*. < https://www.cast-consultancy.com/wp-content/uploads/2019/03/MMC-I-Pad-base_GOVUK-FINAL_SECURE.pdf >
- Lessing, J., Stehn, L., & Ekholm, A. (2005). Industrialised housing: definition and categorization of the concept. *IAARC Proceedings*. < https://www.researchgate.net/publication/265754571_Industrialised_housing_Definition_and_categorization_of_the_concept >
- Bock, T., & Linner, T. (2015). *Robot-Oriented Design: Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction*. Cambridge University Press. < https://www.researchgate.net/publication/290531717_Robot-oriented_design_Design_and_management_tools_for_the_deployment_of_automation_and_robotics_in_construction >

- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling. Wiley. < https://www.researchgate.net/publication/326270076_BIM_Handbook_A_Guide_to_Building_Information_Modeling_for_Owners_Designers_Engineers_Contractors_and_Facility_Managers >
- Espinoza, O., Buehlmann, U., & Smith, P. M. (2016). Cross-laminated timber: Status and research needs in Europe. *BioResources*, 11(1), 281–295.< <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/cross-laminated-timber-status-and-research-needs-in-europe/> >
- UNECE/FAO (2021). Forest Products Annual Market Review 2020–2021. < https://unece.org/sites/default/files/2021-11/2114516E_Inside_Final_web.pdf >
- European Commission (2019). The European Green Deal. COM(2019) 640 final. < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640> >
- European Commission (2021). New European Bauhaus: Beautiful, Sustainable, Together. < https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en >
- Kendall, S., & Teicher, J. (2000). Residential Open Building. E&FN Spon < https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781135806774_A24929137/preview-9781135806774_A24929137.pdf >
- FAO (2020). Forests and Sustainable Cities. United Nations Food and Agriculture Organization. < <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e992f80e-701e-476d-b12d-77fd053b0639/content> >
- Starzyk A., Marchwiński J., Milosevic V.(2023). Circular Wood Construction in a Sustainable Built Environment: A Thematic Review of Gaps and Emerging Topics. *Sustainability*, 17(16), 7333. < <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/16/7333> >
- Ufficio Generale dello sviluppo territoriale ARE, Confederazione Svizzera, 2004. 1972: Conferenza delle Nazioni Unite sull’ambiente umano, Stoccolma. Are.admin.ch. < https://www.are.admin.ch/are/it/home/sviluppo-sostenibile/politica-sostenibilita/agenda2030/onu_-le-pietre-miliari-dello-sviluppo-sostenibile/1972--conferenza-delle-nazioni-unite-sullambiente-umano--stoccol.html >
- United Nations, Vancouver Declaration on Human Settlements, 1976. < <https://mirror.unhabitat.org/downloads/docs/TheVancouverDeclarationOnHumanSettlements.pdf> >
- European Commission (2020). A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives. COM(2020) 662 final. < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0662>>
- European Commission, Joint Research Centre. Buildings. < https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/energy-efficiency/buildings_en>
- European Commission (2019). The European Green Deal. COM(2019) 640 final. < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52019DC0640>>
- European Commission (2020). Circular Economy Action Plan – For a cleaner and more competitive Europe. COM(2020) 98 final.
- European Commission (2021). New European Bauhaus – Concept Paper. < https://new-european-bauhaus.europa.eu/system/files/2021-07/2021-06-30_New_European_Bauhaus_Concept_Paper_HLRT_FINAL.pdf >
- Debacker, W., Manshoven, S. (2016). Circular Retrofit Lab: Design for Change and Circularity. VUB & BAMB Project. < https://www.researchgate.net/publication/357346488_The_Circular_Retrofit_Lab_a_multi-disciplinary_development_of_a_building_envelope_according_to_circular_design_qualities >

- European Commission (2020). A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives. COM(2020) 662 final. < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0662> >
- European Commission, Joint Research Centre. Buildings. < https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/energy-efficiency/buildings_en >
- European Commission (2019). The European Green Deal. COM(2019) 640 final. < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52019DC0640> >
- European Commission (2020). Circular Economy Action Plan – For a cleaner and more competitive Europe. COM(2020) 98 final. < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0098> >
- Observatori Metropolità de l’Habitatge de Barcelona, Informe anual 2023. < <https://www.ohb.cat/en/project/housing-in-the-barcelona-metropolis-in-2023-affordability-and-access-annual-report/> >
- Ajuntament de Barcelona, Pla pel Dret a l’Habitatge 2016–2025, 2020. < https://ajuntament.barcelona.cat/dretssocials/sites/default/files/arxiu-documents/pla_pel_dret_a_l_habitatge_part_1_analisi_i_diagnosi_fi.pdf >
- Idealista, Preu del lloguer a Barcelona 2023. < <https://www.idealista.com/sala-de-prensa/informes-precio-vivienda/alquiler/cataluna/barcelona-provincia/barcelona/> >
- Generalitat de Catalunya, Llei 11/2020 sobre contenció de rendes de lloguer, 2020. < <https://ivalua.cat/ca/revisions-devidencia/avaluabilitat-de-la-llei-de-contencio-dels-preus-del-lloguer-dhabitatges> >

- IMHAB, Habitatge públic a Barcelona: reptes i innovacions, 2022. < https://ajuntament.barcelona.cat/economiatreball/sites/default/files/2025-05/08_Quaderns_210x297_IMHAB2024_CATAL%C3%80_Digital_compressed.pdf >
- Trade of agricultural commodities 2000–2020, FAOSTAT ANALYTICAL BRIEF 44 < <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d0751919-f100-4601-86f1-c35ab3a098f0/content> >
- Malazdrewicz, S., Ostrowski, K. A., & Sadowski, Ł. (2022). Large Panel System Technology in the Second Half of the Twentieth Century—Literature Review, Recycling Possibilities and Research Gaps. Buildings. < https://www.researchgate.net/publication/365071979_Large_Panel_System_Technology_in_the_Second_Half_of_the_Twentieth_Century-Literature_Review_Recycling_Possibilities_and_Research_Gaps >
- Banham, R. (1965). A Home is not a House. Art in America. < http://problemata.huma-num.fr/omeka_beta/files/original/876/fig1_BANHAM_home_not_house_.pdf >
- Pawley, M. (1990). Buckminster Fuller. Taplinger Publishing.
- ArtDaily. (2007, giugno 1). Jean Prouvé’s Prototype Maison Tropicale at Christie’s. ArtDaily. Retrieved [06/08/2025], < <https://artdaily.cc/news/20283/Jean-Prouv--s-Prototype-Maison-Tropicale-at-Christie-s> >
- Abbe, J., & Jones, A. (2025). Impacts of prefabrication in the building construction industry. Sustainability, 3(1), Article 3. < <https://www.mdpi.com/2673-8392/3/1/3> >
- Le Corbusier (1941). La Ville Radieuse. Editions de l’Architecture d’Aujourd’hui.

- Mumford, E. (2000). *The CIAM Discourse on Urbanism, 1928–1960*. MIT Press.
- De Laubier, R. et al. (2019). *The Offsite Revolution in Construction*. Boston Consulting Group. < https://web-assets.bcg.com/img-src/BCG-The-Offsite-Revolution-in-Construction-May-2019-R_tcm9-219473.pdf >
- European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). *Reusable timber panels for safe and sustainable buildings (REUSE)*.
- Digital Innovations in Wooden Construction for a Circular Economy. (2025). *Circular Economy and Sustainability*. <https://www.researchgate.net/publication/394016162_Digital_Innovations_in_Wooden_Construction_for_a_Circular_Economy >
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). *Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – Literature review and future needs*. *Automation in Construction*, 38, 109–127. < https://www.researchgate.net/publication/259518042_Building_Information_Modeling_BIM_for_existing_buildings_-_Literature_review_and_future_needs_Autom_Constr_38_March_2014_109-127 >
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Bergin, R. (2012). *Application of modular construction in high-rise buildings*. *Journal of Architectural Engineering*, 18(2), 148–154. < https://www.researchgate.net/publication/273750778_Application_of_Modular_Construction_in_High-Rise_Buildings >
- Pannell, R. (2024, Marzo 11). *Optimizing efficiency: Inside the Toyota Production System*. LeanScape. Retrieved August 26, 2025, < <https://leanscape.io/optimizing-efficiency-inside-the-toyota-production-system/> >
- Koskela, L. (2000). *An Exploration Towards a Production Theory and its Application to Construction*. VTT Technical Research Centre of Finland. <https://www.researchgate.net/publication/35018344_An_Exploration_Towards_a_Production_Theory_and_its_Application_to_Construction >
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling*. Wiley. < <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1986720> >
- Kamali, M., & Hewage, K. (2016). “Life cycle performance of modular buildings: A critical review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1171–1183. < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301411> >
- Blismas, N., Pendlebury, M., Gibb, A., & Pasquire, C. (2005). “Constraints to the use of off-site production on construction projects.” *Architectural Engineering and Design Management*, 1(3), 153–162. < https://www.researchgate.net/publication/233184882_Constraints_to_the_Use_of_Off-site_Production_on_Construction_Projects >
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Goodier, C. I. (2014). *Design in modular construction*. Boca Raton: CRC Press
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Taylor & Francis.
- Eastman, C. et al. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. Wiley.
- AIA (American Institute of Architects) (2017). *The Architect’s Guide to Integrating Innovation and Practice*.

SITOGRAFIA

- <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20210128STO96607/economia-circolare-in-che-modol-ue-intende-realizzarla-entro-il-2050>, Ultima consultazione 06/05/2025
- https://cinea.ec.europa.eu/index_en?prefLang=it, Ultima consultazione 20/08/2025
- <https://build-up.ec.europa.eu/en/home>, Ultima consultazione 15/07/2025
- <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/the-circular-economy-explained/>, Ultima consultazione 15/07/2025
- <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>, Ultima consultazione 11/08/2025
- <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/built-environment/overview>, Ultima consultazione 15/07/2025
- <https://www.bamb2020.eu/>, Ultima consultazione 15/07/2025
- <https://cordis.europa.eu/article/id/396059-dew-integrated-tools-help-the-building-sector-move-to-a-circular-economy>, Ultima consultazione 06/05/2025
- <https://www.corriere.it/native-adv/eni-longform-04-dall-economia-dell-astronauta-a-quella-circolare-evoluzione-di-un-idea-rivoluzionaria.shtml>, Ultima consultazione 28/06/2025
- https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en, Ultima consultazione 06/03/2025
- <https://public.wmo.int/media/magazine-article/ipcc-issues-special-report-global-warming-of-15-degc>, Ultima consultazione 15/07/2025

- <https://www.un.org/en/climatechange/ipcc-wgii-report>, Ultima consultazione 06/05/2025
- <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>, Ultima consultazione 06/05/2025
- https://commission.europa.eu/news-and-media/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_it, Ultima consultazione 06/05/2025
- <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20180305STO99003/ridurre-le-emissioni-di-anidride-carbonica-obiettivi-e-azioni-dell-ue>, Ultima consultazione 06/08/2025
- <https://archello.com/news/a-modular-and-nomadic-wooden-nursery>, Ultima consultazione 15/07/2025
- <https://www.archdaily.com/943366/a-guide-to-design-for-disassembly>, Ultima consultazione 15/07/2025
- <https://www.gov.uk/government/publications/modern-methods-of-construction-working-group-developing-a-definition-framework>, Ultima consultazione 06/07/2025
- <https://www.wri.org/insights/mass-timber-wood-construction-climate-change>, Ultima consultazione 16/07/2025
- <https://ec.europa.eu/newsroom/env/items/731613/en>, Ultima consultazione 25/04/2025
- <https://woodpop.eu/resources/wood-policy-paper/>, Ultima consultazione 06/05/2025
- <http://ingenio-web.it/articoli/costruzione-virtuale-e-progettazione-dfma-integrata/>, Ultima consultazione 15/07/2025

- <https://henninglarsen.com/projects/wood-city-stockholm>, Ultima consultazione 21/05/2025
- <https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/ledificio-in-legno-piu-alto-al-mondo-e-il-mjostarnet-in-norvegia/>, Ultima consultazione 07/05/2025
- <https://www.are.admin.ch/are/it/home/media-e-pubblicazioni/pubblicazioni/sviluppo-sostenibile/brundtland-report.html>, Ultima consultazione 21/07/2025
- <https://www.ipcc.ch/activities/>, Ultima consultazione 17/08/2025
- <https://climate-adapt.eea.europa.eu/it/metadata/organisations/united-nations-framework-convention-on-climate-change-unfccc>, Ultima consultazione 18/08/2025
- https://www.are.admin.ch/are/it/home/sviluppo-sostenibile/politica-sostenibilita/agenda2030/onu_-le-pietre-miliari-dello-sviluppo-sostenibile/1992--conferenza-delle-nazioni-unite-su-ambiente-e-sviluppo--ver.html, Ultima consultazione 19/08/2025
- https://www.are.admin.ch/are/it/home/sviluppo-sostenibile/politica-sostenibilita/agenda2030/onu_-le-pietre-miliari-dello-sviluppo-sostenibile.html, Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://sdgs.un.org/2030agenda>, Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://arch.bz.it/it/ordine/agenda2023/>, Ultima consultazione 26/08/2025
- <https://asvis.it/goal-e-target-obiettivi-e-traguardi-per-il-2030/>, Ultima consultazione 26/08/2025

- <https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/glossary/paris-agreement.html#:~:text=L'accordo%20di%20Parigi%20costituisce,a%201%2C5%20%C2%B0C.>, Ultima consultazione 02/08/2025
- <https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/summary/the-single-european-act.html>, Ultima consultazione 08/07/2025
- <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/71/politica-ambientale-principi-general-e-quadro-di-riferimento>, Ultima consultazione 24/07/2025
- https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en, Ultima consultazione 24/08/2025
- https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/renovation-wave_en, Ultima consultazione 24/08/2025
- https://next-generation-eu.europa.eu/index_en, Ultima consultazione 23/07/2025
- https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en, Ultima consultazione 24/08/2025
- https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en, Ultima consultazione 04/08/2025
- <https://www.bamb2020.eu/topics/pilot-cases-in-bamb/retrofit-lab/>, Ultima consultazione 12/08/2025
- <https://www.bamb2020.eu/topics/blueprint/>, Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://www.realdaniabyogbyg.org/projects/the-minico2-houses-the-upcycle-house>, Ultima consultazione 24/08/2025

- <https://www.realdaniabyogbyg.org/projects/the-minico2-houses> , Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://www.archdaily.com/458245/upcycle-house-lendager-arkitekter>, Ultima consultazione 18/08/2025
- <https://lexambiente.it/index.php/materie/rifuti/dottrina179/rifuti-il-sottoprodotto-tra-disciplina-probatoria-e-l%E2%80%99esigenza-di-un-cambio-di-prospettiva> , Ultima consultazione 18/08/2025
- <https://cresmedaily.it/occupazione-costruzioni-italia/> , Ultima consultazione 24/08/2025
- https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en , Ultima consultazione 18/08/2025
- https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/renovation-wave_en , Ultima consultazione 18/08/2025
- https://next-generation-eu.europa.eu/index_en , Ultima consultazione 17/08/2025
- https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en , Ultima consultazione 17/08/2025
- https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en , Ultima consultazione 21/08/2025
- <https://www.realdaniabyogbyg.org/projects/the-minico2-houses> , Ultima consultazione 21/08/2025
- <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020IE1076> , Ultima consultazione 21/08/2025
- <https://www.housingeurope.eu/the-state-of-housing-in-the-eu-2019/> , Ultima consultazione 22/08/2025

- <https://cor.europa.eu/it/notizie/crisi-abitativa-i-fondi-ue-sostengano-la-costruzione-di-nuovi-alloggi-sociali-non-solo-le> , Ultima consultazione 22/08/2025
- https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/search-all-eu-institutions-and-bodies/european-economic-and-social-committee-eesc_it , Ultima consultazione 22/08/2025
- <https://archello.com/news/aprop-ciutat-vella-offers-a-strategic-solution-to-gentrification-in-barcelona> , Ultima consultazione 22/08/2025
- <https://lacol.coop/cooperativa/> , Ultima consultazione 23/08/2025
- <https://archello.com/it/project/la-borda-housing-cooperative>, Ultima consultazione 23/08/2025
- <https://divisare.com/projects/466935-lacol-laboqueria-taller-milena-villalba-la-balma-housing-cooperative> , Ultima consultazione 23/08/2025
- <https://abfresearch.nl/publicaties/primos-prognose-2024/> , Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://www.capitalvalue.nl/en/news/new-housing-act-in-the-netherlands-as-per-1-july-2015/> , Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://www.ruimtelijkeordening.nl/onderwerpen/aanpak-novex-gebieden/verstedelijkingsgebieden>
- <https://www.amsterdam.nl/wonen-bouwen-verbouwen/bouwen-verbouwen/omgevingsvergunning/omgevingswet/> , Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://www.ams-institute.org/news/signed-and-sealed-green-deal-timber-construction/> , Ultima consultazione 24/08/2025

- <https://business.gov.nl/subsidy/mia-vamil/>, Ultima consultazione 27/08/2025
- <https://www.eib.org/en/projects/pipelines/all/20160448>, Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://www.eib.org/en/projects/all/20160237> , Ultima consultazione 27/08/2025
- <https://atlas.affordablehousingactivation.org/ficha/de-jakoba-amsterdam/>, Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://studioninedots.nl/project/de-jakoba/>, Ultima consultazione 27/08/2025
- <https://www.domusweb.it/en/architecture/gallery/2023/11/25/de-jakoba-in-amsterdam.html>, Ultima consultazione 04/08/2025
- <https://www.byldis.com/en/showcases/de-jakoba-amsterdam/> , Ultima consultazione 04/08/2025
- <https://archello.com/it/news/concrete-e-moos-completano-un-progetto-di-edilizia-sociale-sostenibile-e-modulare> , Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://www.v2com-newswire.com/en/newsroom/categories/residential-architecture/press-kits/1472-19/moos-a-green-and-social-housing-revolution> , Ultima consultazione 19/08/2025
- <https://wijzijnmoos.nl/our-house/> , Ultima consultazione 19/08/2025
- <https://www.azuremagazine.com/article/rotterdam-modular-housing-moos-euterpe-concrete/> , Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://faro.nl/projecten/brasa-village/>, Ultima consultazione 24/08/2025

- <https://concreteamsterdam.nl/moos-brasa-village-amsterdam>, Ultima consultazione 19/08/2025
- <https://wijzijnmoos.nl/our-street/project-brasa-village-2/> , Ultima consultazione 19/08/2025
- <https://www.front-materials.com/projects/demountable-facade-social-housing-project-amsterdam/> , Ultima consultazione 20/08/2025
- <https://www.brasavillage.nl/> , Ultima consultazione 11/08/2025
- <https://www.search.nl/news/juf-nineke-officially-opened/> , Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://www.dokvast.com/project/woon-werkgemeenschap-juf-nienke/> , Ultima consultazione 24/08/2025
- <https://www.archdaily.com/999856/juf-nienke-apartments-search-plus-rau> , Ultima consultazione 29/08/2025
- https://www.rau.eu/wp-content/uploads/2015/03/20220713-summer_update_Juf_Nienke.pdf , Ultima consultazione 29/08/2025
- <https://www.volantess.nl/en/projects/the-most-sustainable-residential-building-in-the-netherlands/> , Ultima consultazione 29/08/2025