"Part of the journey is the end.."

A.E.S.

Università degli Studi "G. d'Annunzo" Cheti - Pescara

University of Study "G. d'Annunzio" Chieti - Pescara

Scuola Superiore G. d'Annunzio

Dottorato di Ricerca in Culture del Progetto Creatività, Patrimonio, Ambiente

PhD Course in Design Cultures Creativity, Heritage, Environment

Coordinatore

Coordinator

Prof. Maurizio Unali

Collegio dei Docenti

Teaching staff

Proff.

Massimo Angrilli

Federico Bilò

Sebastiano Carbonara

Stefano D'Avino

Giuseppe Di Bucchianico

Filomena Adele Fiadino

Raffaele Giannantonio

Michele Lepore

Antonio Marano

Lorenzo Pignatti

Donatella Radogna

Lucia Serafini

Claudio Varagnoli

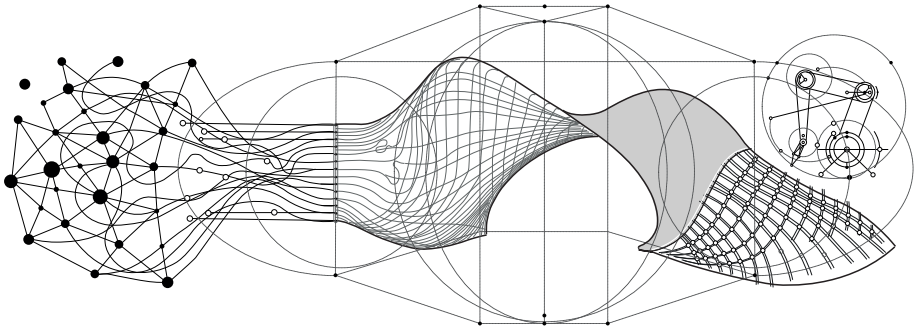
CANDIDATO: **ANTONIO CRISTINO**

XVIII CICLO
DATA **28/07/2026**

TUTOR **PROF.SSA DONATELLA RADOGNA**
CO-TUTOR **PROF.SSA LUCIANA MASTROLONARDO**
CO-TUTOR **PROF. ROBERTO NABONI**

TESI DI DOTTORATO

LA DIGITALIZZAZIONE DEL PROCESSO EDILIZIO VOL.2



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI "G.D'ANNUNZIO" CHIETI PESCARA
DOTTORATO **CULTURE DEL PROGETTO: CREATIVITÀ, PATRIMONIO, AMBIENTE**

ABSTRACT

La tesi analizza il ruolo della transizione digitale nel processo edilizio, assumendo come campo di osservazione il rapporto tra progetto, produzione, costruzione e gestione dell'architettura. Strumenti computazionali, ambienti informativi, sistemi di simulazione, dispositivi immersivi, robotica, digital twin e procedure di fabbricazione digitale stanno modificando in profondità pratiche, tempi, relazioni operative e modalità di controllo, mentre una parte rilevante del quadro normativo e procedurale continua a riflettere una visione ancora scandita per fasi separate, con limitate possibilità di integrazione tra dati, attori, verifiche e processi decisionali. Entro questa distanza tra assetti consolidati e condizioni contemporanee, la ricerca si propone di rileggere criticamente il processo edilizio e di verificarne le possibilità di aggiornamento teorico, metodologico e operativo.
L'obiettivo della tesi consiste nel chiarire in che modo la digitalizzazione possa incidere sulla struttura stessa del processo, come fattore capace di ridefinire l'organizzazione delle informazioni, le forme di coordinamento, le modalità di restituzione del progetto e la continuità tra le diverse fasi della filiera. Il lavoro si concentra in particolare sulla possibilità di costruire un modello più coerente con l'attuale condizione tecnica e culturale dell'architettura, entro il quale raccolta dei dati, interpretazione dei bisogni, comunicazione del progetto, sviluppo produttivo, supporto alla costruzione e gestione informativa possano essere letti come parti di un medesimo sistema relazionale.
La metodologia adottata combina analisi della letteratura, studio critico del quadro normativo, confronto con casi di riferimento e sviluppo di sperimentazioni applicate.
Una prima linea di indagine riguarda la progettazione e, in particolare, l'impiego di strumenti partecipativi per la raccolta di abitudini, esigenze, preferenze e feedback de-

gli utenti. In questo ambito la ricerca approfondisce la costruzione di questionari, la strutturazione dei dataset e l'uso di procedure di analisi capaci di trasformare informazioni eterogenee in indicazioni utili al progetto. Questo passaggio consente di superare una partecipazione meramente dichiarativa e di orientarla verso forme di interpretazione più strutturate, verificabili e comparabili.

La tesi dedica, su questo piano, un'attenzione specifica ai sistemi di intelligenza artificiale e ai modelli linguistici di grandi dimensioni, considerati sia come oggetto di riflessione sia come strumenti utili alla ricerca. Nel corso del lavoro, questi sistemi sono stati impiegati per lo sviluppo di specifici dispositivi sperimentali di analisi e restituzione dei dati, nonché come supporto ad alcune operazioni di organizzazione, sintesi e rielaborazione dei materiali testuali e analitici, entro un processo costantemente verificato e controllato dall'autore. La loro presenza, all'interno della tesi, viene quindi trattata in termini metodologici e operativi, con attenzione al rapporto tra automazione, interpretazione e responsabilità scientifica.

La comunicazione del progetto costituisce una seconda direttrice della ricerca, viene esaminato il contributo offerto da sistemi immersivi, ambienti navigabili, piattaforme interattive e dispositivi di visualizzazione avanzata, osservandone il valore rispetto alla comprensione dello spazio, alla condivisione delle informazioni e alla raccolta di riscontri da parte di interlocutori diversi. La comunicazione viene così riletta come parte attiva del processo progettuale e non come rappresentazione finale. L'impiego di ambienti digitali esplorabili, strumenti di realtà aumentata e virtual tour consente infatti di verificare la capacità dei sistemi immersivi di sostenere processi di restituzione più accessibili, comparabili e aperti al confronto.

Produzione e costruzione vengono assunte come ambiti nei quali la transizione digitale modifica sia la natura degli strumenti sia l'assetto delle relazioni tra progetto, materia, fabbricazione, logistica e assemblaggio. In questa prospettiva vengono analizzati i rapporti tra progettazione computazionale, ottimizzazione, fabbricazione digitale, procedure robotizzate e cantierizzazione assistita, con particolare attenzione alla continuità informativa tra definizione geometrica, dati materiali, sequenze operative e controllo esecutivo. Il digital twin consente, in questo quadro, di stabilire una connessione più stabile tra rappresentazione, monitoraggio, tracciamento dei componenti e gestione dei flussi informativi lungo il ciclo di vita dell'opera.

Le sperimentazioni sviluppate nel corso della ricerca hanno consentito di mettere alla prova tali ipotesi su casi applicativi differenti. Il caso studio RE-Bridge, condotto presso la University of Southern Denmark, ha offerto un campo di indagine utile per osservare l'interazione tra ottimizzazione geometrica, catalogazione dei componenti, fabbricazione, assemblaggio e supporto digitale alla costruzione. L'integrazione tra modelli parametrici, sistemi di stoccaggio informato, strumenti di realtà aumentata e logiche di digital twin ha consentito di leggere con maggiore precisione il valore operativo della continuità digitale tra le diverse fasi del processo.

La tesi costruisce una lettura integrata del processo edilizio contemporaneo e definisce un impianto metodologico che mette in relazione analisi normativa, sperimentazione progettuale e sviluppo di strumenti digitali. Il lavoro mostra come dati, intelligenza artificiale, sistemi immersivi, robotica e digital twin possano concorrere alla formulazione di processi più coordinati, leggibili e adattabili, capaci di attribuire al progetto una funzione di regia estesa lungo l'intera

filiera. Entro questa linea, la ricerca riconosce anche la necessità di un aggiornamento del lessico, dei criteri interpretativi e dei riferimenti normativi, così che il processo edilizio possa essere descritto e governato in modo coerente con le forme di integrazione tecnica, informativa e relazionale che oggi ne ridefiniscono struttura e funzionamento.

INDICE

13 **1 | PARTE PRIMA INQUADRAMENTO DEL TEMA, OBIETTIVI E IMPOSTAZIONE METODOLOGICA**

14 QUADRO DI RIFERIMENTO DELLO STUDIO

26 PROSPETTIVE DI RICERCA

30 OBIETTIVI DELLA RICERCA

32 ITER DELLA RICERCA

45 **2 | PARTE SECONDA- NORMATIVA E PROCESSO EDILIZIO**

48 2.0 EVOLUZIONE STORICA DELLA NORMATIVA ITALIANA

54 2.1 LIMITI NELLA NORMATIVA ITALIANA

86 2.2 CONFRONTO CON LA NORMATIVA EUROPEA

118 2.3 PROSPETTIVE DI AGGIORNAMENTO DELLA NORMATIVA ITALIANA

122 2.4 ANALISI E LIMITI DEL PROCESSO EDILIZIO

124 2.5 PROSPETTIVE DI AGGIORNAMENTO DEL PROCESSO EDILIZIO

144 2.6 INTRODUZIONE DEGLI STRUMENTI DIGITALI NELLA NORMATIVA ITALIANA

166 2.7 RIORGANIZZAZIONE DELLE FASI DEL PROCESSO EDILIZIO.

171 **3 | PARTE TERZA: PROGETTAZIONE**

172 3.1 DIGITALIZZAZIONE NELLA PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA

176 3.2 STRUMENTI E APPROCCI ALLA PROGETTAZIONE

192 3.2.1 MODELLI E PARTECIPAZIONE NELLA PROGETTAZIONE

197 3.2.2 LIMITI STRUTTURALI DEI MODELLI PARTECIPATIVI

200 3.2.3 STRUMENTI DIGITALI NELLA PROGETTAZIONE PARTECIPATA

202 3.3 INTELLIGENZA ARTIFICIALE IN ARCHITETTURA E PROSPETTIVE DI INNOVAZIONE
210 3.3.1 INTELLIGENZA ARTIFICIALE E PROCESSO PARTECIPATIVO
214 3.3.2 ORGANIZZARE IL PROCESSO PROGETTUALE COME INFRASTRUTTURA DI CONOSCENZA
217 3.3.3 SISTEMI GENERATIVI E PARTECIPAZIONE COME STRUTTURA DECISIONALE DEL PROCESSO PROGETTUALE
222 3.4 NUOVO RUOLO DEL PROGETTISTA
228 3.5 VARIABILE TEMPO NEL PROGETTO
292 3.6 NUOVO MODELLO PROGETTUALE
327 3.7 ANALISI DEI DATI NELLA PROGETTAZIONE PARTECIPATA E SISTEMI DI INTELLIGENZA ARTIFICIALE
330 3.7.1 RUOLO DEI DAT
334 3.7.2 COSTRUZIONE DEI QUESTIONARI
338 3.7.3 DATASET E INFRASTRUTTURE INFORMATIVE
344 3.7.4 ANALISI DEI DATASET MEDIANTE MODELLI L.L.M
360 3.7.5 UTILIZZO DEI MODELLI LINGUISTICI NELL'ANALISI DEI DATI
364 3.7.6 LIMITI METODOLOGICI E CONDIZIONI DI VALIDITÀ NELL'ANALISI DEI DATASET
370 3.7.7 STRUMENTI GENERATIVI PER LA PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA
383 3.8 MODELLI GENERATIVE E I.A. NELLA PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA
390 3.8.1 SISTEMI GENERATIVI PER LA PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA
399 3.9 COMUNICAZIONE NEL PROCESSO PROGETTUALE
402 3.9.1 ATTORI, STRUMENTI E LIMITI DELLE RAPPRESENTAZIONI
406 3.9.2 TECNOLOGIE IMMERSIVE PER LA COMUNICAZIONE DEL PROGETTO ARCHITETTONICO

414 3.9.3 STRUMENTI COMUNICATIVI PER LA PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA
438 3.10 APPLICAZIONE DEL MODELLO SU CASI STUDIO

472 4 | PARTE QUARTA: FASE DI PRODUZIONE
474 4.1 TITOLO CAPITOLO
510 4.2 TITOLO CAPITOLO

527 5 | PARTE QUINTA: FASE DI COSTRUZIONE
532 5.1 ASSEMBLAGGIO COLLABORATIVO UOMO-ROBOT
538 5.2 DIGITAL TWIN E CONTROLLO DEL PROCESSO COSTRUTTIVO
546 5.3 SISTEMI XR PER IL MONTAGGIO E L'ITERAZIONE OPERATIVA
554 5.4 INTRODUZIONE AL DIAGRAMMA DI FLUSSO TRA PRODUZIONE E COSTRUZIONE
562 5.5 CASO SPERIMENTALE: RE-BRIDGE
616 5.6 CASO SPERIMENTALE: C_02

623 5 | PARTE SESTA: CONCLUSIONI
624 6.1 CONCLUSIONI
632 6.2 CONTRIBUTO DELLA TESI
638 6.3 LIMITI DELLA RICERCA E SVILUPPO FUTURI
644 6.4 AGGIORNAMENTO NORMATIVO DEL PROCESSO EDILIZIO DIGITALIZZATO

650 6.5 PROPOSTA DI INTEGRAZIONE NORMATIVA
658 6.6 SCALABILITÀ,FLESSIBILITÀ E SVILUPPO DEL PROCESSO
660 6.7 CONSIDERAZIONI FINALI

663 BIBLIOGRAFIA
705 GLOSSARIO
729 ABBREVIAZIONI



Figura — Fase di produzione: lavorazione robotica per milling di componenti lignei nel laboratorio CREATE della SDU.

Fonte: fotografia dell'autore, University of Southern Denmark, laboratorio CREATE.

4 | PARTE QUARTA
PRODUZIONE

4.1 EVOLUZIONE DEL PROCESSO PRODUTTIVO IN ARCHITETTURA

I processi di progettazione e costruzione che caratterizzano la produzione architettonica seguono storicamente modalità differenti rispetto ai modelli industriali. Nei settori manifatturieri consolidati, l'organizzazione produttiva si basa su processi standardizzati, filiere integrate e sistemi di automazione avanzata. Il settore delle costruzioni presenta invece una struttura operativa segnata da elevata frammentazione, configurazioni temporanee di progetto e una significativa incidenza di pratiche esecutive di matrice artigianale. Questa condizione ha contribuito a produrre una distanza tra il settore edilizio e le dinamiche di innovazione che hanno interessato altri ambiti della produzione industriale nel corso del XX e XXI secolo. Il settore delle costruzioni rappresenta tuttavia uno dei comparti economici più rilevanti a livello globale e incide direttamente sulla trasformazione dell'ambiente costruito, sull'organizzazione degli insediamenti, sull'impiego delle risorse materiali ed energetiche e sulla configurazione delle infrastrutture urbane. La scala economica e territoriale di tali trasformazioni rende evidente lo scarto tra il peso complessivo del settore e il livello di innovazione che caratterizza i suoi processi produttivi.

Diversi tentativi hanno cercato di avvicinare la produzione edilizia ai modelli dell'industria moderna. Dalle prime esperienze di industrializzazione del XX secolo, il dibattito architettonico ha individuato in standardizzazione, serialità, modularità e prefabbricazione strumenti orientati all'efficienza dei processi costruttivi e alla riduzione dei costi. Queste sperimentazioni hanno introdotto nel settore edilizio principi propri della produzione manifatturiera, senza però determinare una trasformazione strutturale parago-

nabile a quella osservata in altri ambiti industriali. La specificità del processo edilizio, legata alla realizzazione di manufatti spesso unici, alla pluralità degli attori coinvolti e alla relazione con il contesto locale, continua infatti a produrre assetti organizzativi e produttivi caratterizzati da elevata variabilità e complessità.

Negli ultimi decenni, l'introduzione di tecnologie digitali ha modificato il quadro operativo dei processi produttivi in architettura. Strumenti computazionali avanzati, progettazione parametrica, fabbricazione digitale e piattaforme di coordinamento informativo hanno ridefinito il rapporto tra progettazione e produzione, favorendo una maggiore integrazione tra le fasi del processo edilizio. In questo scenario, la digitalizzazione consente di combinare standardizzazione dei processi e adattabilità delle soluzioni progettuali. L'integrazione tra computational design, digital fabrication e sistemi di gestione dei dati rende così possibile l'elaborazione di modelli produttivi capaci di coniugare efficienza industriale e specificità architettonica. Questo paradigma, definito come mass customization, rappresenta una possibile evoluzione dei modelli produttivi tradizionali e apre nuove prospettive per la trasformazione dell'industria delle costruzioni.

Alla luce di queste considerazioni, il presente capitolo analizza l'evoluzione del processo produttivo in architettura, con l'obiettivo di comprendere come il settore delle costruzioni stia progressivamente transitando da modelli produttivi tradizionali verso sistemi sempre più integrati, digitalizzati e orientati alla personalizzazione. In questa prospettiva, il primo passaggio dell'analisi riguarda l'esame delle principali criticità che caratterizzano l'industria delle costruzioni contemporanea, tema affrontato nel paragrafo successivo.

4.1.1 CRITICITÀ STRUTTURALI NEL PROCESSO PRODUTTIVO E COSTRUTTIVO

Il settore delle costruzioni costituisce uno dei comparti economici più importanti a livello globale, sia in termini di valore economico sia per l'impatto sociale e territoriale che esercita sulle trasformazioni dello spazio costruito. Contribuisce alla formazione del prodotto interno lordo di molti Paesi e coinvolge una filiera estremamente ampia di attori, che comprende progettisti, imprese, produttori di componenti, operatori finanziari e amministrazioni pubbliche[1]. Il settore presenta livelli di innovazione e produttività inferiori rispetto a quelli osservati in altri comparti industriali.
Una delle criticità più frequentemente evidenziate riguarda il **divario di produttività** tra il settore delle costruzioni e l'industria manifatturiera. Nel settore manifatturiero la produttività è cresciuta progressivamente grazie all'introduzione di processi automatizzati, sistemi digitali e modelli produttivi avanzati. Nel settore delle costruzioni gli incrementi di produttività risultano invece più contenuti, con lunghi periodi caratterizzati da livelli sostanzialmente stabili[2]. Questa condizione contribuisce a descrivere il comparto edilizio come uno dei settori meno trasformati dai processi di digitalizzazione rispetto ad altri ambiti produttivi.
L'ambiente virtuale sviluppato nella ricerca è stato implementato attraverso una piattaforma web accessibile tramite diversi dispositivi digitali. Questa scelta metodologica risponde all'esigenza di rendere lo strumento facilmente utilizzabile da parte degli utenti, senza la necessità di software specialistici o competenze tecniche avanzate.

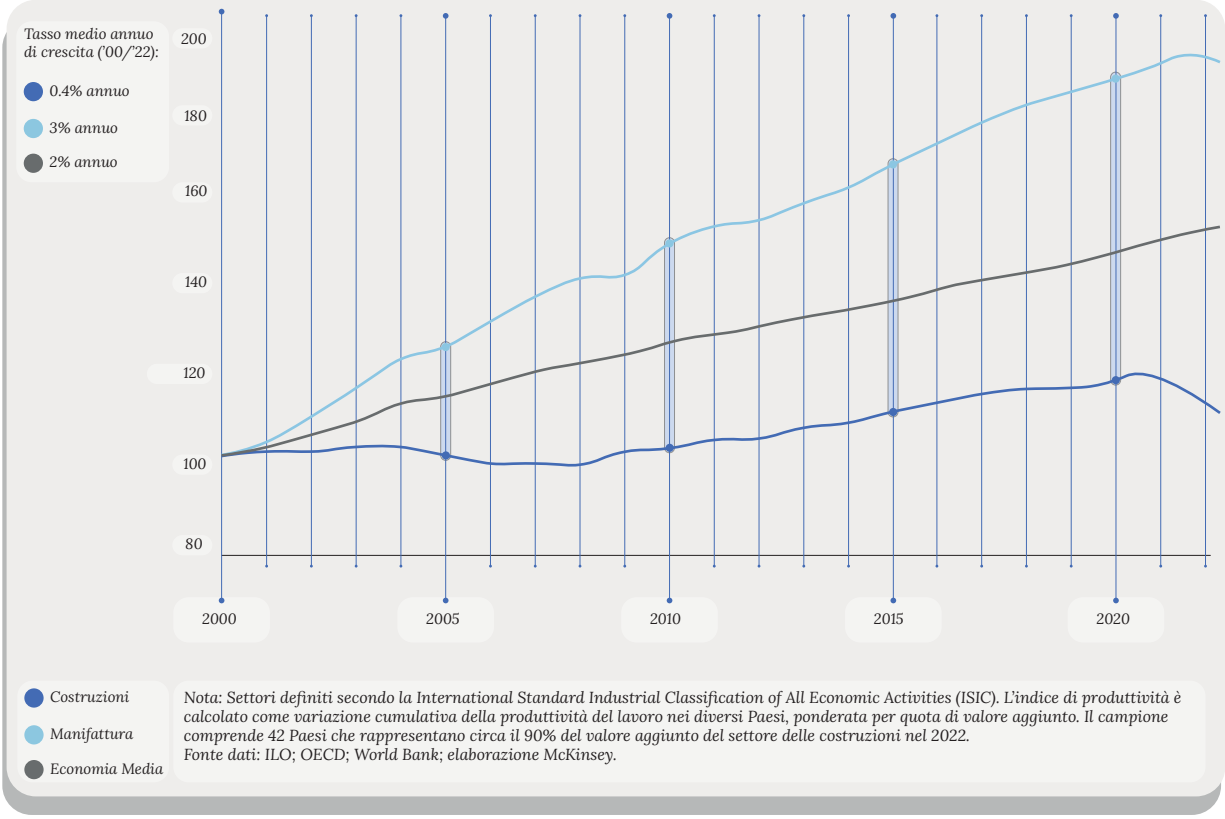


Figura 4.0
Andamento della produttività nel settore delle costruzioni rispetto alla manifattura e all'economia complessiva (2000–2022).
Il grafico evidenzia come la crescita della produttività nel settore delle costruzioni risulta inferiore rispetto ad altri comparti dell'economia. Mentre il settore manifatturiero registra un incremento medio annuo pari a circa il 3%, e l'economia complessiva circa il 2%, il settore delle costruzioni mostra una crescita estremamente limitata, 0,4%. Questa divergenza mette in evidenza le difficoltà strutturali del comparto edilizio nell'integrare processi di innovazione, industrializzazione e digitalizzazione.
Fonte: rielaborazione dell'autore su dati McKinsey & Company, *Global productivity in construction industry*, 2024.

Il settore delle costruzioni è caratterizzato da una serie di condizioni strutturali legate alla natura del processo edilizio. La produzione edilizia risulta fortemente influenzata dalla specificità del contesto territoriale, dalla variabilità delle condizioni di cantiere e dalla presenza di normative tecniche e amministrative articolate. Ogni progetto tende quindi a configurarsi come un caso in parte unico, nel quale la replicabilità dei processi produttivi rimane più limitata rispetto ai sistemi di produzione seriale tipici dell'industria manifatturiera[3].

La filiera produttiva del settore delle costruzioni è caratterizzata da un'elevata frammentazione. Il processo edilizio coinvolge una pluralità di soggetti con competenze differenti: progettisti, ingegneri, imprese, fornitori, enti pubblici, che operano con gradi di autonomia. Questa configurazione organizzativa limita l'integrazione dei processi e introduce criticità nel coordinamento tra le diverse fasi del ciclo edilizio[4]. La separazione tra progettazione, produzione dei

componenti e costruzione in cantiere genera discontinuità informative che incidono sulla qualità complessiva del processo.

Queste caratteristiche hanno contribuito a consolidare un modello produttivo fortemente basato sulla **produzione in situ,** nella quale una parte significativa delle lavorazioni avviene direttamente nel cantiere. Questa modalità operativa comporta una minore possibilità di controllo delle condizioni produttive rispetto ai processi industriali svolti in ambienti controllati, oltre a una maggiore esposizione a variabili esterne come condizioni climatiche, disponibilità di manodopera e complessità logistiche[5].

Il settore delle costruzioni presenta livelli relativamente bassi di **digitalizzazione e integrazione informativa** rispetto ad altri comparti industriali. Sebbene strumenti come il Building Information Modeling (BIM) abbiano progressivamente introdotto nuove modalità di gestione delle informazioni progettuali, la loro diffusione rimane ancora disomogenea a livello internazionale e spesso limitata a specifici contesti professionali o a progetti di maggiore complessità.[6] Le criticità del settore edilizio vengono spesso ricondotte alla struttura storica del suo modello produttivo, caratterizzato da processi sequenziali, organizzazioni frammentate e limitata integrazione tra le diverse fasi del ciclo edilizio. A partire da queste condizioni strutturali, nel corso del XX secolo sono emerse diverse strategie orientate alla riorganizzazione del sistema produttivo dell'architettura e delle costruzioni. Tra queste strategie rientrano i tentativi di industrializzazione e standardizzazione della produzione edilizia, che hanno costituito uno dei principali paradigmi del progetto moderno.

In questo senso, l'industrializzazione dell'architettura può essere interpretata come uno dei primi tentativi sistematici di superare le inefficienze del processo edilizio attraverso l'introduzione di logiche produttive derivate dall'industria manifatturiera. Tale prospettiva ha trovato espressione in diversi movimenti culturali e progettuali del Novecento, tra cui il Movimento Moderno e l'esperienza del Bauhaus, nei quali l'architettura viene progressivamente reinterpretata come parte di un più ampio sistema produttivo industriale. L'analisi di queste trasformazioni rappresenta il punto di partenza per comprendere l'evoluzione del paradigma produttivo in architettura e introduce il tema della **standardizzazione della costruzione**, che verrà approfondito nel paragrafo successivo.

1 Hillebrandt (2000)
2 McKinsey Global Institute (2017)
3 Ball (2015)
4 Winch (2010)
5 Eastman et al. (2018)
6 World Economic Forum (2016)

4.1.2 INDUSTRIALIZZAZIONE E STANDARDIZZAZIONE

L'industrializzazione delle costruzioni modifica in profondità l'organizzazione del processo edilizio moderno. Nel settore dell'architettura introduce una logica produttiva basata su coordinamento dei componenti, ripetibilità dei sistemi costruttivi, scomposizione del progetto in parti compatibili e trasferimento di una quota crescente delle decisioni dalla fase di cantiere alla fase di progetto. Questo orientamento investe l'intero assetto del processo edilizio: definizione dei componenti, formalizzazione delle sequenze di montaggio, controllo della variabilità esecutiva, codificazione delle prestazioni e maggiore integrazione tra progettazione, produzione e assemblaggio. L'industrializzazione supera quindi il solo tema della prefabbricazione e coinvolge la struttura stessa dell'atto progettuale. Il progetto assume progressivamente il compito di preordinare il comportamento dei materiali, la forma dei componenti e la compatibilità reciproca tra le parti del sistema costruttivo.

La base teorica di questa trasformazione viene formulata con particolare chiarezza nel pensiero di Walter Gropius. Nei testi dedicati al Bauhaus e alla Total Architecture, l'istanza moderna si organizza attorno all'idea che edifici e beni d'uso debbano essere "specificamente progettati per la produzione industriale", e che il progetto debba operare come strumento di coordinamento tra forma, tecnica, materiali e processo manifatturiero. All'interno di questa visione, il Bauhaus agisce come laboratorio orientato alla definizione di "standard types", cioè di tipi e modelli capaci di entrare in rapporto diretto con l'industria, con la produzione in serie e con le esigenze economiche del proprio tempo. La standardizzazione assume quindi il valore di una costruzione culturale prima ancora che tecnica: selezione dell'essenziale, controllo della qualità, rapporto tra economia di mezzi e chiarezza formale, organizzazione razionale

della produzione.[1]
Questa trasformazione si colloca nel contesto delle profonde modificazioni che interessano il settore delle costruzioni tra XIX e XX secolo. L'espansione urbana associata alla rivoluzione industriale e, successivamente, i programmi di ricostruzione europea del secondo dopoguerra determinano un aumento della domanda edilizia e richiedono modalità produttive più efficienti.[2] In questo scenario l'industrializzazione viene interpretata come il passaggio da pratiche costruttive tradizionali a sistemi di produzione moderni. Il cambiamento riguarda sia i materiali sia le tecniche di produzione e conduce a una progressiva riorganizzazione dell'architettura come sistema di componenti coordinati. L'evoluzione delle tecniche costruttive introduce inoltre una relazione più stretta tra costruzione e forma, nella quale la geometria entra a far parte della logica produttiva del progetto.[3]

Un primo effetto di questa trasformazione riguarda il rapporto tra materiale, peso e comportamento costruttivo. L'introduzione dell'iron construction alla fine del XVIII secolo apre una fase nella quale leggerezza ed efficienza diventano criteri sempre più rilevanti nella definizione delle strutture edilizie. La maggiore densità del ferro rispetto alla pietra e al legno rende necessario un controllo più preciso del rapporto tra massa e prestazione. In questo contesto l'organizzazione degli elementi costruttivi tende a orientarsi verso la riduzione del peso proprio, la distinzione tra componenti principali e secondari e una maggiore corrispondenza tra forma della struttura e proprietà del materiale.[4]
A questo primo livello di trasformazione si affianca, nel corso dell'Ottocento e del primo Novecento, un secondo livello ancora più incisivo: la conversione dell'innovazione strutturale in **convenzione tecnica**. Il progresso dei sistemi costruttivi segue spesso una traiettoria che conduce dall'invenzio-

ne episodica alla progressiva stabilizzazione in tipologie, manuali tecnici, regole di calcolo e codici di progetto.[5] La standardizzazione può essere interpretata come un processo di articolazione e implementazione del sapere tecnico.[6] Nel settore delle costruzioni questa dinamica si manifesta in tre ambiti distinti ma interrelati: materiali e processi di fabbricazione, sistemi strutturali, metodi di progetto.
La standardizzazione dei materiali e dei processi consente un aumento della produzione, una riduzione dei tempi di realizzazione e una maggiore prevedibilità dei costi. La standardizzazione dei sistemi strutturali trasforma l'innovazione tecnica in tipologia ripetibile. La standardizzazione dei metodi di progetto conduce alla formazione di manuali, linee guida e codici di pratica.

La classificazione delle strutture secondo la relazione tra forma e comportamento resistente consente di organizzare la complessità del progetto entro famiglie riconoscibili, confrontabili e ripetibili.[7] La tipologia diventa così uno strumento di stabilizzazione del sapere costruttivo e permette il passaggio da una fase di sperimentazione aperta a un repertorio di soluzioni consolidate. Nel primo Ottocento le serre in ferro e vetro mostrano con chiarezza questo processo: una fase iniziale, caratterizzata da un uso ancora poco gerarchizzato del nuovo materiale, lascia progressivamente spazio a una più definita articolazione tra elementi principali e secondari. Da questa evoluzione emerge una tipologia destinata a essere ripresa in stazioni, exhibition halls e grandi coperture. La tipologia rende quindi l'innovazione trasferibile e condivisibile all'interno del processo costruttivo.
Sul piano produttivo, l'industrializzazione si consolida attraverso la standardizzazione degli elementi e, in una fase successiva, delle loro aggregazioni. La produzione seriale di componenti identici introduce tolleranze misurabili, in-

tercambiabilità delle parti, semplificazione del montaggio e maggiore controllo dei costi. La seconda rivoluzione industriale coincide con la diffusione di macchine utensili che aumentano la capacità produttiva e favoriscono la standardizzazione degli elementi edilizi.[8] In questa condizione la produzione di massa si afferma come modello operativo e sistemi come il balloon frame e il platform frame nordamericano diventano esempi di una costruzione basata su pezzi standardizzati, reciprocamente intercambiabili e facilmente assemblabili. Il passaggio successivo riguarda la standardizzazione delle aggregazioni, con la definizione di sistemi modulari e component-based, tra cui il General Panel System sviluppato da Walter Gropius e Konrad Wachsmann.[9]

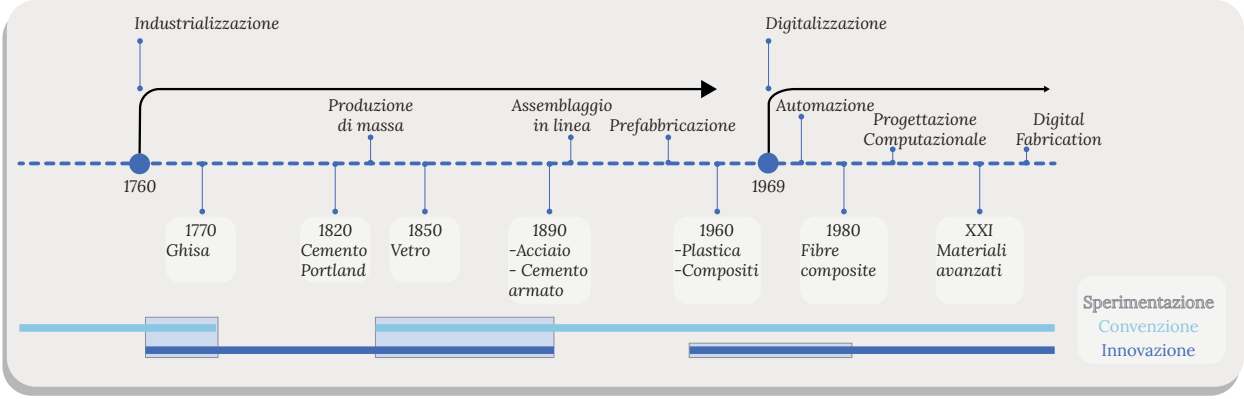


Figura 4.1
Industrializzazione, standardizzazione e sviluppo delle tipologie strutturali.
Il diagramma sintetizza l'evoluzione del processo costruttivo dall'età dell'industrializzazione all'età della digitalizzazione, evidenziando il passaggio dall'innovazione alla convenzione e la progressiva definizione di tipologie, manuali e codici di progetto.
Fonte: elaborazione dell'autore, ispirata a M. Gil Pérez, Integrative Structural Design of Non-Standard Building Systems

Con la diffusione della prefabbricazione il processo edilizio si articola in modo più netto tra operazioni di processing e operazioni di assembly. Le lavorazioni che definiscono forma, prestazioni e caratteristiche dei componenti possono svolgersi in luoghi tecnicamente e logisticamente più idonei, mentre l'assemblaggio resta legato al sito definitivo dell'opera. In questa configurazione una parte crescente del controllo costruttivo si concentra nella fase di progetto e nella produzione dei componenti: nel disegno dei giunti, nella definizione delle tolleranze e nell'organizzazione delle sequenze di montaggio.[12] Il cantiere assume progressivamente una struttura più coordinata e prevedibile.

La stessa logica produttiva incide anche sul ruolo dell'archi-

tetto e dell'ingegnere. Il progetto si orienta verso una cultura del sistema nella quale conoscenza dei materiali, processi di lavorazione e organizzazione della produzione entrano a far parte di un unico quadro operativo. Il tipo standard diventa il dispositivo attraverso cui il progetto entra nella catena produttiva e ne orienta il funzionamento.10 La stessa esigenza si ritrova oggi nelle pratiche di design for manufacturing, design-to-production e nei sistemi di fabbricazione robotica, che estendono la relazione tra progetto e produzione all'interno di ambienti digitali di progettazione e fabbricazione.[11]

All'interno di questo assetto la standardizzazione produce un forte effetto di ordinamento del processo. Riduce la dispersione, aumenta il controllo e rende ripetibili i sistemi costruttivi. Quando la serializzazione investe l'edificio come prodotto finito, la razionalizzazione produttiva tende però a tradursi in uniformità dell'esito architettonico. La serializzazione dell'edificio, anziché del sistema costruttivo, comprime la variabilità e riduce la capacità del progetto di accogliere differenze di contesto, di uso e di configurazione. Da questa tensione emerge il passaggio successivo, nel quale la digitalizzazione del processo edilizio ridefinisce il rapporto tra standardizzazione e variabilità, spostando l'attenzione dalla rigidità dell'esito alla regolazione flessibile di componenti, informazioni e protocolli di produzione.

In questa prospettiva l'industrializzazione e la standardizzazione delle costruzioni rappresentano una riformulazione del processo edilizio moderno. Entrano stabilmente nel lessico del progetto categorie come sistema, tipo, modulo, componente, tolleranza, assemblaggio, codice e controllo. La prefabbricazione diventa il presupposto operativo di questa trasformazione e trasferisce una parte significativa del sapere costruttivo nella fase di progetto. Rimane aperta la questione della variabilità e della personalizzazione, dalla quale prende avvio il confronto con i limiti della costruzione

standardizzata e con le successive logiche di integrazione digitale e di mass customization che costituiscono il quadro teorico del capitolo.

1 Walter Gropius, Scope of Total Architecture, Collier Books, New York, 1962, in particolare “My Conception of the Bauhaus Idea” e “Development of Standard Types”.
2 A.B. Ngowi, L. Pienaar, C. Talukhaba, J.J. Mbachu, “The globalisation of the construction industry – a review”, 2005.
3 H. Kloft, Textile Architecture, Birkhäuser, Basel, 2005.
4 David P. Billington, The Tower and the Bridge. The New Art of Structural Engineering, Prince ton Architectural Press, New York, 1985.
5 Bill Addis, “Inventing a History for Structural Engineering Design”, in Proceedings of the First International Congress on Construction History, 2003; Bill Addis, Structural and Civil Enginee ring Design, Routledge, London, 2016.
6 David Livingstone, Trevor Russell, “Standardization”, 2005.
7 Heino Engel, Structure Systems, 1968.
8 Siegfried Giedion, Mechanization Takes Command, 1948.
9 Gilbert Herbert (ed.), The Packaged House: A Wartime Proposal, in Walter Gropius, Konrad Wachsmann, The Dream of the Factory-Made House, MIT Press, 1984.
10 A.M. Seelow, “The Construction Kit and the Assembly Line—Walter Gropius’ Concepts for Rationalizing Architecture”, Arts, 7(4), 2018.
12 T. Bock, T. Linner, Robotic Industrialization: Automation and Robotic Technologies for Custo mized Component, Module, and Building Prefabrication, Cambridge University Press, New York, 2015.
12 T. Bock, S. Langenberg, “Changing Building Sites: Industrialisation and Automation of the Building Process”, Architectural Design, 84, 2014.

4.1.3 LIMITI DELLA STANDARDIZZAZIONE

La standardizzazione introduce nel processo edilizio condizioni di maggiore stabilità operativa. L'impiego di componenti definiti e ripetibili consente il coordinamento delle parti, la definizione delle tolleranze, la chiarificazione delle sequenze di montaggio e la riduzione della variabilità esecutiva. In questo assetto, una quota crescente della complessità costruttiva viene trasferita dal cantiere alla fase di progetto, nella quale si definiscono le relazioni tra gli elementi, la compatibilità dei componenti e l'organizzazione del sistema costruttivo. Il processo assume così un grado più elevato di controllabilità e programmabilità e si avvicina alle logiche della produzione industriale[1]. La standardizzazione può estendersi dal processo alla configurazione dell'esito architettonico. La serializzazione dei componenti, la modularità rigida, la ripetizione di schemi distributivi e costruttivi, l'adozione di sistemi chiusi di aggregazione e la generalizzazione di tipologie fortemente codificate trasformano uno strumento di coordinamento in un principio di organizzazione dell'intero progetto. In questa configurazione, il controllo del sistema costruttivo viene perseguito mediante riduzione della variabilità, semplificazione delle relazioni tra le parti e definizione di repertori formali sempre più prevedibili[2]. Il limite della costruzione standardizzata riguarda quindi la scala di applicazione della standardizzazione. Quando essa opera sul piano delle interfacce, dei moduli, delle tolleranze e delle sequenze di assemblaggio, contribuisce all'efficienza del processo edilizio e alla costruzione di un sistema produttivo più affidabile. Quando investe il carattere complessivo dell'edificio, la logica industriale produce una riduzione della variabilità architettonica e della capacità del progetto di rispondere a condizioni differenziate di contesto, uso e abitabilità. La questione riguarda così il rapporto tra stan-

dardizzazione del processo e standardizzazione del risultato: la prima sostiene l'organizzazione del sistema, la seconda produce esiti più rigidi e una minore capacità di assorbire la complessità della domanda edilizia[3].

Questa tensione emerge con particolare evidenza nei sistemi costruttivi del secondo dopoguerra. La prefabbricazione pesante, la produzione seriale di pannelli, la modularità chiusa e la ripetizione di schemi distributivi omogenei consentono di rispondere rapidamente alla domanda abitativa e di accelerare la ricostruzione, ma definiscono anche un repertorio di soluzioni fortemente tipizzato, entro il quale il margine di adattamento del progetto si riduce. L'industrializzazione agisce qui come principio di semplificazione dell'intero edificio, oltre che della sua catena produttiva. La costruzione standardizzata assume così un carattere prescrittivo: il sistema determina in larga misura la forma, l'organizzazione dello spazio, le possibilità di aggregazione e la durata delle scelte progettuali. In questa configurazione, l'efficienza costruttiva viene perseguita attraverso la stabilizzazione di soluzioni ripetibili, e la ripetibilità si consolida come criterio di progetto[4].

All'interno di questa traiettoria, la riduzione della complessità costituisce il nodo più rilevante. I sistemi industriali classici operano con maggiore efficacia in presenza di problemi ripetibili, utenze trattate come categorie relativamente omogenee, contesti semplificati e condizioni d'uso ricondotte a parametri medi. L'architettura interviene invece su condizioni fortemente situate, nelle quali variano luogo, clima, morfologia del sito, domanda sociale, quadro normativo, durata attesa dei manufatti e relazione tra spazi, usi e trasformazioni future. In presenza di tale pluralità, la costruzione standardizzata tende a selezionare ciò che risulta più facilmente controllabile e a comprime-

re ciò che eccede la logica del sistema. Il progetto perde così parte della propria capacità di mediazione tra tecnica, spazio e vita quotidiana, poiché l'esigenza di efficienza orienta la configurazione verso schemi già stabilizzati[5].

A questo si aggiunge un secondo livello critico, relativo al rapporto tra efficienza produttiva e qualità architettonica. La standardizzazione consente di abbreviare i tempi, ridurre alcune variabili di costo, aumentare il controllo qualitativo su singoli elementi e favorire la prevedibilità del montaggio. Quando però viene assunta come regola complessiva del progetto, tende a produrre ambienti nei quali la logica costruttiva prevale sulla capacità di articolare lo spazio in relazione a usi, utenti e contesti differenti. In questa condizione, la qualità dell'architettura dipende sempre più dalla capacità del progettista di operare entro un sistema predefinito, più che dalla possibilità di modulare la relazione tra forma, struttura, materiale e programma. La serialità si trasforma così da vantaggio industriale a soglia critica del progetto, soprattutto quando investe la dimensione abitativa e l'organizzazione dello spazio quotidiano[6].

È in questo quadro che la letteratura contemporanea ha progressivamente reinterpretato il problema della standardizzazione. La riflessione sul design for manufacturing, sulla componentizzazione evoluta, sulla digital fabrication e sui workflow integrati mostra infatti che l'eredità del paradigma industriale conserva ancora un ruolo fondamentale, purché venga riformulata. La standardizzazione continua a essere necessaria sul piano delle logiche di produzione, dei protocolli di coordinamento, delle interfacce tra componenti e dei sistemi di verifica; acquista tuttavia un carattere più aperto quando viene accompagnata da strumenti capaci di governare la variabilità, la differenziazione e la complessità. Il passaggio decisivo consiste allora nello spostare il

baricentro della standardizzazione: dall'uniformità dell'esito alla regolazione del processo, dal prodotto chiuso al sistema adattivo, dalla serialità rigida alla compatibilità tra parti variabili[7].

I sistemi costruttivi del secondo dopoguerra mostrano con chiarezza questa condizione. La prefabbricazione pesante, la produzione seriale di pannelli, la modularità chiusa e la ripetizione di schemi distributivi omogenei permettono di rispondere rapidamente alla domanda abitativa e di accelerare la ricostruzione; allo stesso tempo definiscono un repertorio di soluzioni fortemente tipizzato, nel quale il margine di adattamento del progetto si riduce. L'industrializzazione agisce qui sull'edificio nel suo insieme. Il sistema costruttivo orienta la forma, l'organizzazione dello spazio, le modalità di aggregazione e la durata delle scelte progettuali. L'efficienza viene perseguita attraverso la stabilizzazione di soluzioni ripetibili. La ripetibilità entra così tra i criteri del progetto[4].
La riduzione della complessità costituisce uno dei caratteri centrali di questo modello.
I sistemi industriali classici operano con maggiore efficacia quando il problema è ripetibile, l'utenza viene trattata come categoria relativamente omogenea e il contesto viene riportato entro condizioni medie. L'architettura si confronta invece con situazioni variabili. Cambiano il luogo, il clima, la morfologia del sito, la domanda sociale, il quadro normativo, la durata attesa dei manufatti, la relazione tra spazi, usi e trasformazioni future. In presenza di questa pluralità, la costruzione standardizzata seleziona ciò che è facilmente controllabile e riduce ciò che eccede la logica del sistema. Il progetto perde così parte della propria capacità di mediazione tra tecnica, spazio e vita quotidiana[5].
Un altro punto riguarda il rapporto tra efficienza produttiva e qualità architettonica. La standardizzazione abbrevia i

tempi, riduce alcune variabili di costo, aumenta il controllo qualitativo sui singoli elementi e rende più prevedibile il montaggio. Quando viene applicata come regola complessiva del progetto, la logica costruttiva tende però a prevalere sulla capacità di articolare lo spazio in relazione a usi, utenti e contesti differenti. La qualità dell'architettura dipende allora dalla capacità di operare entro un sistema già definito, più che dalla possibilità di modulare la relazione tra forma, struttura, materiale e programma. La serialità, da vantaggio della produzione industriale, diventa una soglia critica del progetto, soprattutto quando investe la dimensione abitativa e l'organizzazione dello spazio quotidiano[6].
La riflessione sviluppata intorno a questi processi ha progressivamente riconsiderato il ruolo della standardizzazione. La standardizzazione resta necessaria sul piano della produzione, del coordinamento tra componenti, delle interfacce e dei protocolli di controllo. Il suo significato cambia quando viene accompagnata da strumenti capaci di governare variabilità e differenziazione. Il passaggio decisivo riguarda lo spostamento del suo campo di azione: dall'uniformità dell'esito alla regolazione del processo, dal prodotto chiuso a sistemi adattivi, dalla serialità rigida alla compatibilità tra parti variabili[7].

Questa distinzione compare già nelle riflessioni più avanzate sul rapporto tra industria e progetto. La standardizzazione può operare come principio di organizzazione senza coincidere con la ripetizione formale dell'edificio. L'interesse del Bauhaus per gli standard types e per la produzione industriale si colloca in questo quadro. Il problema dei modelli standardizzati novecenteschi riguarda soprattutto il modo in cui la standardizzazione viene estesa all'esito edilizio complessivo, fino a trasformare uno strumento di coordinamento in un vincolo formale generalizzato[8].
La fase della digitalizzazione rende questa distinzione an-

cora più evidente. Le tecnologie contemporanee mostrano che il controllo industriale del processo può convivere con la differenziazione dei componenti, con la variabilità geometrica e con una maggiore capacità di adattamento del progetto. Modellazione computazionale, simulazione, fabbricazione digitale e sistemi di assemblaggio assistito rendono possibile una struttura produttiva altamente organizzata senza ridurre l'architettura alla ripetizione tipologica. Il limite della costruzione standardizzata diventa così il punto di avvio di un diverso paradigma: il passaggio da una mass production fondata sull'omogeneità degli esiti a una mass customization fondata sulla standardizzazione delle regole di processo e sulla differenziazione controllata dei risultati[9]. Il superamento della costruzione standardizzata riguarda quindi la riformulazione della logica industriale, non il suo abbandono. Interoperabilità, flessibilità, configurazione parametrica, variabilità compatibile e gestione digitale delle informazioni indicano la possibilità di mantenere il controllo del processo senza assumere come necessario il carattere uniforme del prodotto. Da qui si apre il problema dei sistemi nei quali efficienza produttiva e specificità del progetto possano sostenersi reciprocamente. In questo passaggio la standardizzazione smette di coincidere con la ripetizione e diventa il supporto tecnico di una nuova generazione di processi edilizi integrati.

1W. Gropius, Scope of Total Architecture, Collier Books, New York, 1962; A.M. Seelow, "The Construction Kit and the Assembly Line—Walter Gropius' Concepts for Rationalizing Architecture", Arts, 7(4), 2018.
2G. Herbert (ed.), The Packaged House: A Wartime Proposal. In: W. Gropius, K. Wachsmann, The Dream of the Factory-Made House, MIT Press, 1984.
3T. Russell, Standardization, 2005; H. Engel, Structure Systems, 1968.
4 T. Bock, T. Linner, Robotic Industrialization: Automation and Robotic Technologies for Customized Component, Module, and Building Prefabrication, Cambridge University Press, 2015.
5 B. Addis, Structural and Civil Engineering Design, Routledge, London, 2016; D.P. Billington, The Tower and the Bridge, Princeton Architectural Press, 1985.
6 A. Forty, Words and Buildings: A Vocabulary of Modern Architecture, Thames & Hudson, 2000; K. Frampton, Studies in Tectonic Culture, MIT Press, 1995.
7 T. Bock, S. Langenberg, "Changing Building Sites: Industrialisation and Automation of the Building Process", Architectural Design, 84, 2014.
8W. Gropius, The New Architecture and the Bauhaus, MIT Press, Cambridge.
9 T. Bock, T. Linner, op. cit.; testi e ricerche recenti su digital fabrication, workflow integrati e component-based design.

Protocollo Operativo

Fase	*Benefici Introdotti*	*Criticità Emerse*
Standardizzazione dei componenti	*Compatibilità,controllo qualitativo, riduzione degli errori*	*Riduzione della variabilità compositiva*
Modularità	*Semplificazione dell'assemblaggio, rapidità esecutiva*	*Rigidità nelle aggregazioni e nelle configurazioni spaziali*
Serialità Produttiva	*Efficenza economica, riduzione dei tempi, prevedibilità*	*Uniformità tipologica e scarsa risposta a esigenze differenziate*
Sistemi Chiusi	*Controllo del processo e delle interfacce*	*Bassa adattabilità a contesti e usi specifici*
Codificazione Tecnica	*Verificabilità, trasferibilità e replicabilità del sapere costruttivo*	*Riduzione della capacità sperimentale e progettuale*

Tabella 8
Vantaggi e limiti della costruzione standardizzata.
La tabella sintetizza i principali effetti prodotti dall'introduzione di logiche standardizzate nel processo edilizio, mettendo in evidenza il rapporto tra efficienza produttiva, controllo tecnico e progressiva riduzione della variabilità architettonica.
Fonte: elaborazione dell'autore.

4.1.4 DIGITALIZZAZIONE DEL PROCESSO E PROGETTO INTEGRATO

La digitalizzazione del processo produttivo introduce nel settore delle costruzioni una trasformazione che riguarda simultaneamente strumenti, metodi, modelli organizzativi e criteri di coordinamento del processo edilizio[1]. Il suo effetto principale consiste nella costruzione di una continuità informativa tra attività che, nel paradigma industriale novecentesco, tendevano ancora a operare come domini separati: progettazione geometrica, analisi strutturale, verifica prestazionale, pianificazione produttiva, fabbricazione e assemblaggio[2]. In questa configurazione il progetto non si limita più a descrivere anticipatamente l'opera, ma organizza un ambiente informativo nel quale dati geometrici, parametri tecnici, vincoli costruttivi e informazioni di produzione vengono mantenuti all'interno di uno stesso sistema operativo[3].

Su questa base, il progetto integrato definisce una nuova forma del lavoro progettuale. La modellazione digitale consente di far convergere nello stesso ambiente geometria, comportamento strutturale, logiche costruttive, limiti di produzione, tolleranze e criteri di assemblaggio, trasformando il modello in una struttura capace di sostenere l'intero processo edilizio[4]. Il progetto assume così il carattere di una piattaforma operativa che mette in relazione intenzione formale, comportamento dei materiali, requisiti prestazionali e condizioni di realizzazione□. La forma non viene più trattata come risultato separato dalla propria costruibilità, ma come esito di una correlazione continua tra dati, relazioni e vincoli che restano attivi lungo tutto il processo□. La cosiddetta digitalisation age coincide precisamente con questa riconfigurazione del rapporto tra progetto e produzione□. L'integrazione tra CAD, CAE e CAM consente infatti di costruire una continuità tra modellazione, analisi e fab-

bricazione che riduce le fratture tradizionali tra disegno, verifica tecnica e costruzione. All'interno di questi workflow, la decisione progettuale può essere controllata, aggiornata e ridefinita in relazione alle proprie implicazioni strutturali, costruttive e produttive. La digitalizzazione non accelera soltanto procedure già note, ma modifica la logica stessa del processo: le informazioni generate in una fase restano disponibili, attive e capaci di incidere sulle fasi successive, secondo una struttura di feedback continuo. Il progetto integrato si definisce quindi come processo iterativo. Struttura, geometria, materiale e fabbricazione partecipano fin dalle prime fasi alla costruzione del risultato, e la coerenza del sistema dipende dalla capacità di farle interagire entro uno stesso ambiente informativo[10]. Questa condizione appare con particolare evidenza nei casi caratterizzati da elevata complessità geometrica, nei quali la forma può essere mantenuta coerente solo attraverso l'integrazione precoce di vincoli prestazionali e costruttivi[11]. Il progetto si configura così come un campo di relazioni nel quale i parametri non descrivono soltanto la forma, ma ne orientano il comportamento, ne verificano le condizioni di realizzazione e ne coordinano l'inserimento nella catena produttiva[12].

È su questo terreno che la computazione modifica in profondità il modo di costruire il progetto. Il passaggio dal disegno digitale al computational design introduce modelli generativi fondati su regole, parametri e relazioni, capaci di produrre famiglie di soluzioni e di integrare all'interno dello stesso ambiente condizioni strutturali, prestazionali e produttive[13]. La computazione amplia in modo decisivo la quantità di informazioni trattabili all'interno del processo progettuale rispetto ai modelli lineari tradizionali[14]. La forma diventa allora l'esito di una struttura relazionale nella quale proprietà dei materiali, logiche di assemblaggio, limiti delle macchine ed esigenze di controllo entrano a far parte

del campo generativo del progetto[15].
L'interoperabilità costituisce la condizione operativa di questo assetto. La quantità di dati richiesta dai processi contemporanei richiede infatti continuità informativa tra modelli, documenti, attori e strumenti differenti[16]. La compartimentazione storica del settore AEC, già presente nel paradigma industriale, diventa più critica quando aumentano sia la complessità progettuale sia il numero delle relazioni tra soggetti, sistemi e ambienti di lavoro[17]. L'interoperabilità riguarda quindi il funzionamento stesso del progetto integrato: solo la continuità del dato, lo scambio coerente delle informazioni e la permanenza delle relazioni tra ambienti diversi rendono possibile una gestione unitaria del processo produttivo[18].
Questa continuità trova una estensione ulteriore nei cyber-physical systems, nei quali dominio digitale e dominio fisico entrano in una relazione dinamica e adattiva[19].
Sensori, sistemi di monitoraggio, dispositivi di comunicazione e strumenti di controllo costruiscono processi nei quali l'informazione interviene non solo nella definizione del progetto, ma anche nella fabbricazione, nell'assemblaggio e nella regolazione operativa dell'esecuzione[20]. Il progetto assume così la forma di un processo aperto, capace di registrare il proprio svolgimento, di aggiornare la lettura dello stato del sistema e di intervenire su alcune condizioni operative in tempo reale[21]. L'integrazione riguarda allora la relazione continua tra previsione, esecuzione e controllo, e trasforma il modello in una struttura attiva che accompagna il processo oltre la fase della sola definizione formale[22].

Questa trasformazione risulta particolarmente rilevante nei casi che coinvolgono componenti differenziati o sistemi non standardizzati[23]. La standardizzazione novecentesca aveva affidato la propria efficacia alla ripetizione di elementi identici; i workflow digitali integrati consentono invece

di mantenere controllo, precisione e coordinamento anche in presenza di geometrie variabili, purché il processo venga governato da una struttura informativa coerente[24]. La variabilità diventa così una condizione trattabile attraverso parametri, script, protocolli di fabbricazione e logiche di assemblaggio formalizzate[25]. Il controllo industriale non si fonda più necessariamente sull'uniformità dell'esito, ma sulla capacità di regolare la differenziazione entro un sistema di dati, regole e interfacce condivise[26].

Il significato storico della digitalizzazione del processo produttivo si chiarisce proprio in questo spostamento. La standardizzazione tende a trasferirsi dal piano dell'omogeneità del prodotto a quello dei protocolli, dei formati, delle interfacce e delle regole di coordinamento[27].
Il progetto diventa il luogo nel quale questa complessità viene raccolta, organizzata e resa operativa. La fabbricazione entra nel progetto come sua condizione interna; l'assemblaggio riceve istruzioni sempre più specifiche e sempre più strettamente collegate al modello informativo[28]. Da qui prende forma il passaggio verso computational design e digital fabrication, che costituiscono il nucleo del paradigma contemporaneo della produzione architettonica[29].

4.1.5 COMPUTATIONAL DESIGN, DIGITAL FABRICATION E AUTOMAZIONE DELLA FASE DEL PROCESSO PRODUTTIVO

4.1.5.1 AUTOMAZIONE DELLA PRODUZIONE E TRASFORMAZIONE DEL SETTORE

L'automazione della costruzione modifica l'organizzazione contemporanea del settore edilizio, intervenendo su strumenti, metodi, assetti produttivi e relazioni tra progetto e realizzazione[1]. Nel comparto delle costruzioni una parte estesa delle attività continua a svolgersi attraverso procedure manuali, mentre l'impiego di tecnologie computazionali di fabbricazione rimane ancora circoscritto. Questa condizione incide su costi, qualità esecutiva, uso delle risorse e continuità del controllo produttivo[2]. L'automazione introduce quindi una diversa struttura operativa del processo: il progetto entra in relazione con macchine a controllo digitale, procedure di prefabbricazione, sistemi di assemblaggio programmato e forme di coordinamento più precise rispetto al cantiere convenzionale[3].

L'automazione viene letta attraverso il concetto di *advanced customization*, che descrive un'industria delle costruzioni più flessibile, orientata al miglioramento della qualità edilizia e della differenziazione progettuale mediante strumenti *computer-controlled*, ricerca sperimentale e integrazione tra design e produzione[4]. Le tecnologie digitali e robotiche operano così come dispositivi che ridefiniscono l'intera *design-to-production chain*[5]. Il loro contributo riguarda la possibilità di collegare progettazione, fabbricazione e montaggio entro una stessa catena informativa e operativa, nella quale il componente viene concepito, prodotto e assemblato all'interno di un campo di controllo unitario[6]. Questa trasformazione incide direttamente sul rapporto tra off-site

production e attività di cantiere. I componenti prefabbricati, prodotti in ambiente controllato, consentono infatti di trasferire fuori opera una quota di lavorazioni, con vantaggi legati a precisione, controllo qualitativo, riduzione di alcune variabili esecutive e semplificazione logistica[7].
La modular construction si colloca in questo passaggio: una parte sostanziale della struttura viene realizzata off-site e successivamente trasportata sul sito per l'assemblaggio finale, con una conseguente ridefinizione dell'uso dei macchinari, delle sequenze di montaggio e del rapporto tra fabbrica e cantiere[8]. In questa configurazione le attività del processo edilizio si distribuiscono diversamente tra produzione e cantiere, con un maggiore peso delle operazioni svolte in ambiente controllato. Dentro questo scenario, il robot industriale rappresenta un vantaggio non soltanto per velocità, precisione e ripetibilità, ma anche per programmabilità e versatilità che lo rendono compatibile con processi differenziati e con componenti variabili[9].

L'automazione robotica e le tecnologie di prefabrication personalizzata aprono una fase nella quale la produzione industriale può essere mantenuta anche in presenza di customized components, modules e sistemi di *building prefabrication*[10]. Il robot entra così in una infrastruttura produttiva più ampia che comprende modellazione, simulazione, generazione dei dati di macchina e organizzazione delle sequenze di assemblaggio[11].

1 Naboni, Paoletti (2015)
2 Willmann et al. (2015)
3 Bock, Linner (2015)
4 Naboni, Paoletti (2015)
5 Marble (2012)
6 Marble (2012)
7 Leder et al. (2019)
8 Leder et al. (2019)
9 Bock, Linner (2015)
10 Bock, Linner (2015)
11 Marble (2012)

4.1.5.2 COMPUTATIONAL DESIGN E PARAMETRIC OPTIMISATION

Il computational design costituisce il nucleo teorico e operativo di questa trasformazione, poiché rende possibile un progetto fondato su relazioni, parametri, vincoli e sistemi di feedback, anziché sulla semplice definizione statica di una forma[12]. L'introduzione della computazione modifica in profondità il modo di concepire e realizzare forma, spazio e struttura, rendendo possibile l'organizzazione dell'architettura come sistema generativo aperto[13]. In questo quadro, i *digitally driven design processes* consentono di sviluppare trasformazioni tridimensionali dinamiche e di ampliare il campo delle possibilità architettoniche e costruttive trattabili all'interno del progetto[14].
Il rapporto tra computazione e prestazione definisce uno degli aspetti centrali del computational design. In questo ambito il progetto viene organizzato come sistema capace di mettere in relazione forma, comportamento strutturale e condizioni di realizzazione[15]. L'integrazione tra *performance-based design e digital workflow* introduce processi nei quali la *data integration* tra discipline e le procedure di *post-processing per lo structural feedback* rendono più rapido e coordinato lo scambio iterativo di informazioni[16]. L'inserimento della valutazione strutturale all'interno dei modelli parametrici consente inoltre di attivare fast feedback già nelle prime iterazioni progettuali[17]. La parametrizzazione trasforma così il modello in una struttura relazionale capace di reagire a modifiche locali e di riallineare il sistema in funzione dei vincoli prestazionali.

Nei progetti caratterizzati da elevata complessità geometrica, la progettazione parametrica acquista valore soprattutto per la capacità di costruire un ambiente di controllo nel quale forma, prestazione e processo di realizzazione re-

stano reciprocamente connessi[18]. Il punto centrale riguarda la possibilità di organizzare configurazioni complesse entro una struttura relazionale capace di reagire a variazioni locali senza perdere coerenza sistemica[19]. In questo quadro, il computational design opera come infrastruttura di coordinamento tra geometria, simulazione e logiche costruttive, mentre il feedback strutturale entra nelle prime iterazioni del progetto come fattore di orientamento e ottimizzazione[20]. La progettazione parametrica consente di trasformare il modello in un sistema dinamico di dipendenze, nel quale la definizione della forma è continuamente riallineata alle condizioni di comportamento, alle esigenze di produzione e alle possibilità di assemblaggio[21]. Il passaggio dalla standardizzazione rigida alla differenziazione controllata rende trattabile una variabilità elevata entro un quadro progettuale formalizzato e verificabile[22].

La *parametric optimization* introduce nel progetto un sistema di regolazione basato su parametri che mettono in relazione forma, materia, struttura e processo[23]. Il modello definisce un campo di configurazioni possibili governato da relazioni esplicite tra variabili progettuali. La computazione permette di trattare la complessità come oggetto operativo e di organizzare il progetto come procedura di regolazione. Il passaggio dalla standardizzazione rigida alla differenziazione controllata richiede una struttura di regole capace di governare serie di elementi differenti mantenendo coerenza sistemica[24].

---

12 Menges, Ahlquist (2011)
13 Menges, Ahlquist (2011)
14 Kolarevic (2004)
15 Kloft (2005)
16 Kloft (2005)
17 Preisinger, Heimrath (2014)
18 Kolarevic (2004)
19 Menges, Ahlquist (2011)
20 Kloft (2005)
21 Preisinger, Heimrath (2014)
22 Jabi (2013)
23 Menges, Ahlquist (2011)
24 Adel

4.1.5.3 DIGITAL FABRICATION E PROCESSO CYBER-PHYSICAL

La *digital fabrication* estende sul piano materiale le trasformazioni introdotte dal computational design. Il modello digitale viene tradotto in istruzioni operative, sequenze di lavorazione, controllo delle tolleranze e organizzazione dell'assemblaggio[25].

In questa configurazione dominio computazionale e dominio fisico entrano in una relazione attiva e reciproca[26].

La produzione partecipa così alla definizione del progetto e diventa una delle condizioni attraverso cui esso prende forma. Questa impostazione modifica il rapporto tra forma e materializzazione. La computazione opera come interfaccia per l'esplorazione materiale e integra fabbricazione digitale, produzione automatizzata e controllo del processo[27] [28]. La fabbricazione digitale consente di programmare la materia, articolare differenze locali, ridurre il consumo di risorse, costruire gerarchie strutturali e reinterpretare sistemi costruttivi tradizionali attraverso criteri di ottimizzazione[29].

Il rapporto tra materia, forma e produzione viene ridefinito con maggiore precisione quando la fabbricazione digitale interviene su sistemi costruttivi già esistenti[30].

Simulazione, ottimizzazione locale, strategie avanzate di formwork e tecniche additive o robotiche entrano nello stesso quadro operativo e permettono una distribuzione più controllata del materiale e una maggiore precisione esecutiva[31]. Limiti delle macchine, logiche di lavorazione, sequenze di assemblaggio e proprietà del materiale partecipano direttamente alla costruzione della soluzione[32].

Il progetto assume così il carattere di una procedura materialmente informata, capace di ridurre sprechi, aumentare il controllo e rendere fabbricabili configurazioni che i metodi convenzionali trattano con minore efficienza[33]. Questa condizione appare con particolare chiarezza nella produzione

di componenti non standardizzati. La differenziazione degli elementi diventa praticabile attraverso la formalizzazione digitale delle relazioni tra dati, lavorazione e montaggio[34]. La fabbricazione digitale mostra così la compatibilità tra precisione industriale e variabilità controllata. Il dato digitale governa la differenziazione entro un sistema di regole, protocolli e logiche coerenti di trasferimento dell'informazione[35]

25 Menges (2015)
26 Menges (2015)
27 Menges (2015)
28 Mostafavi et al. (2015); Mostafavi, Bier (2016)
29 Adel
30 Marble (2012); Adel
31 Adel
32 Mostafavi, Kemper, Du (2019)
33 Adel
34 Marble (2012); Adel
35 Bock, Linner (2015)

4.1.5.4 ROBOTICA, PREFABBRICAZIONE E CATENA DESIGN-TO-PRODUCTION

Il collegamento tra *computational design e digital fabrication* trova una definizione operativa nelle catene *design-to-production*. In questo ambito robotica e prefabbricazione consentono di estendere il controllo digitale ai processi di lavorazione e di assemblaggio su scala architettonica[36].
Nel campo della costruzione in legno, la catena digitale di produzione viene assunta come condizione per la lavorazione di elementi differenziati con livelli di produttività prossimi a quelli della produzione seriale[37]. L'efficacia dei metodi integrativi dipende dalla formalizzazione congiunta dei vincoli del sistema costruttivo e delle tecniche di produzione, che entrano direttamente nella costruzione del progetto[38].

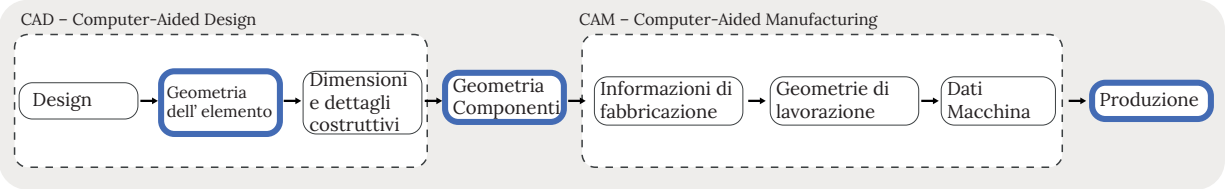


Figura 4.2
Dal computational design al design-to-production.
Il diagramma rappresenta il passaggio dalla definizione geometrica del progetto alla generazione dei dati di fabbricazione, evidenziando la continuità tra modellazione digitale, informazione costruttiva e produzione.
Fonte: elaborazione dell'autore, ispirata a A. Adel, *Computational Design for Cooperative Robotic Assembly of Nonstandard Timber Frame Buildings, Fig. 2.1*

I componenti prodotti mediante CNC o **robot industriali** vengono preordinati in funzione del trasporto e del montaggio successivo, secondo una logica nella quale precisione della lavorazione e organizzazione della sequenza costruttiva appartengono allo stesso processo[39]. In questa configurazione la *modular construction* riguarda la produzione *off-site* e, insieme, la riorganizzazione del rapporto tra progetto, produzione e sito costruito[40].
La prefabbricazione avanzata, sostenuta da strumenti digitali e sistemi robotici, consente di trasferire in ambiente controllato una parte estesa delle operazioni che nel cantiere convenzionale dipendono dalla variabilità locale e dalla gestione continua del dettaglio[41]. Da qui prende forma il passaggio verso la *mass customization*. *Computational design, digital fabrication, robotica e prefabbricazione* mostrano

la possibilità di produrre componenti differenziati all'interno di catene industriali ad alto livello di controllo, purché il sistema sia organizzato attraverso parametri, dati di macchina, logiche di assemblaggio e protocolli di coordinamento condivisi[42]. Il progetto contemporaneo mantiene così il controllo industriale del processo senza fondarsi sulla ripetizione di elementi identici. La serialità lascia spazio a una differenziazione governata digitalmente e la standardizzazione si trasferisce dal prodotto alle regole del processo[43].

Protocollo Operativo

Fase	*Modello Digitale*	*Design to production*
Ruolo del Modello	*Descrizione geometrica dell'elemento*	*Sistema informativo e operativo del processo*
Rapporto tra forma e prestazione	*Verifica successiva alla definizione formale*	*Integrazione tra generazione della forma e feedback prestazionale*
Rapporto con la fabbricazione	*Traduzione a valle in istruzioni esecutive*	*Continuità diretta tra progetto, dati di macchina e produzione*
Gestione della complessità	*Controllo parziale, spesso affidato a revisioni successive*	*Coordinamento paramentrico di vincoli, dati e relazioni*
Componenti Prodotti	*Prevalenza di elementi uguali o poco differenziati*	*Gestione dei componenti differenziati entro workflow coerenti*
Assemblaggio	*Fase subordinata e successiva al progetto*	*Parte integrante della logica progettuale e produttiva*
Esito Produttivo	*Standardizzazione rigida*	*Differenziazione controllata*

Tabella 9
La tabella confronta il modello digitale orientato alla rappresentazione geometrica e modello informativo-produttivo nel quale parametri progettuali, prestazioni, dati di fabbricazione e sequenze di assemblaggio vengono integrati in una catena operativa continua tra progetto e produzione.
Fonte: elaborazione dell'autore su letteratura relativa a computational design, digital fabrication e design-to-production.

36 Adel
37 Adel
38 Willmann et al. (2015); Kunić, Naboni, Kramberger, Schlette (2021)
39 Leder et al. (2019)
40 Bock, Linner (2015)
41 Pine (1993)
42 Adel

4.1.6 MASS PRODUCTION E MASS CUSTOMIZATION

Il passaggio dalla **mass production** alla **mass customization** costituisce uno degli esiti più rilevanti della trasformazione contemporanea del processo produttivo in architettura e nelle costruzioni[1]. Se il modello industriale novecentesco aveva fondato la propria efficacia sulla ripetizione seriale, sulla stabilità dei componenti e sulla riduzione della variabilità, il quadro attuale introduce una diversa condizione operativa, nella quale il controllo industriale del processo viene mantenuto pur in presenza di configurazioni differenziate, elementi non identici e risposte localmente adattate[2]. Il superamento della produzione di massa coincide con la sua riformulazione: la standardizzazione si sposta dall'uniformità del prodotto alle regole che governano il processo.

La **mass production** ha rappresentato a lungo il modello di riferimento per l'industrializzazione edilizia. La sua forza risiedeva nella possibilità di ridurre tempi e costi, aumentare la prevedibilità e rendere il processo più controllabile attraverso la ripetizione di componenti identici o fortemente omogenei[3]. La serialità, la modularità rigida, la standardizzazione delle aggregazioni e la ripetizione di schemi costruttivi consolidati costituivano gli strumenti principali di questa organizzazione produttiva[4]. In questo sistema, l'efficienza cresceva al diminuire della variabilità, e l'identità tra i pezzi diventava la condizione fondamentale della razionalità industriale.

Nel settore delle costruzioni, questa logica mostra i propri limiti, l'architettura opera infatti su contesti differenti, usi molteplici, condizioni ambientali variabili, esigenze funzionali non omogenee e richieste prestazionali sempre più articolate[5]. In presenza di questa complessità, la ripetizione dell'identico cessa di essere una risposta sufficiente. Il modello della mass production, pur mantenendo una notevole efficacia sul piano dell'organizzazione, tende a produrre

rigidità tipologica, ridotta adattabilità e difficoltà nel recepire la pluralità delle condizioni reali del costruire contemporaneo[6]. La sua crisi dipende dalla variabilità: diventa una componente strutturale del progetto e non più una semplice eccezione.

Da qui emerge la necessità di un processo capace di coniugare **efficienza industriale e differenziazione controllata.** La mass customization si colloca precisamente in questa soglia, poiché rende possibile una produzione organizzata, precisa e coordinata pur in presenza di elementi differenti e configurazioni non standardizzate[7]. La personalizzazione entra così entro sistemi produttivi altamente razionalizzati e smette di coincidere con un ritorno a modalità artigianali o episodiche. La differenza diventa una condizione prevista e governata all'interno di workflow operativi.
La trasformazione diventa praticabile grazie alla convergenza tra **computational design, digital fabrication, robotica, prefabbricazione avanzata e catene design-to-production**[8]. La progettazione parametrica consente di definire famiglie di componenti variabili attraverso regole comuni; la fabbricazione digitale traduce tali differenze in istruzioni operative senza interrompere la continuità del processo; la robotica e i sistemi di produzione assistita rendono possibile la lavorazione di elementi non identici mantenendo livelli elevati di precisione, ripetibilità e controllo[9]. In questo quadro la variabilità entra nel sistema produttivo come dato formalizzato attraverso parametri, dati di macchina, interfacce e logiche di assemblaggio.
Il significato della *mass customization* si definisce in questo spostamento, l'efficienza dipende dalla capacità del sistema di produrre differenze compatibili all'interno di una struttura regolata[10]. La standardizzazione continua a esistere, ma cambia natura: riguarda la coerenza dei protocolli, la stabilità delle interfacce, la continuità del dato e la compatibilità

tra progetto, produzione e montaggio[11]. Il sistema produttivo resta industriale, mentre l'esito cessa di essere rigidamente uniforme.
La produzione di massa tendeva a far coincidere efficienza e uniformità; la mass customization rende compatibili precisione produttiva, differenziazione spaziale e adattamento ai contesti[12]. La personalizzazione entra così nel processo edilizio come componente interna e programmabile. Questo vale sul piano geometrico, con componenti differenti ma coordinati, e sul piano prestazionale, con elementi capaci di rispondere in modo mirato a esigenze strutturali, ambientali e funzionali diversificate[13].

La mass customization può quindi essere letta come una forma evoluta di industrializzazione. Il suo obiettivo riguarda un grado più alto di complessità organizzata[14]. Controllo del processo, precisione esecutiva, tracciabilità dei dati e chiarezza delle sequenze di montaggio restano centrali; cambia il modo in cui queste condizioni vengono utilizzate. L'organizzazione industriale sostiene la realizzazione di sistemi differenziati, adattivi e informati digitalmente[15].
L'obiettivo della ricerca riguarda la possibilità di ripensare il processo industriale in modo da rendere compatibili standardizzazione del processo e personalizzazione dell'esito[16]. Gli elementi possono così differenziarsi nella configurazione pur appartenendo a una struttura comune di regole, dati, protocolli e criteri di assemblaggio. Il paradigma contemporaneo costruisce il proprio valore in questa possibilità: mantenere il controllo produttivo e rendere la variabilità operabile.
Industrializzazione e standardizzazione hanno costruito il fondamento storico del controllo produttivo. La digitalizzazione ha trasformato il processo edilizio in ambiente informativo integrato. *Computational design e digital fabrication hanno* reso praticabile la produzione di componenti diffe-

renziati. Robotica e prefabbricazione avanzata hanno esteso questa logica alla scala costruttiva[17]. La mass customization ricompone questi passaggi entro una prospettiva unitaria, nella quale organizzazione industriale, precisione esecutiva e adattamento progettuale cessano di apparire come condizioni incompatibili.

Il superamento della produzione di massa coincide così con una maturazione del paradigma industriale e non con la sua dissoluzione. La costruzione contemporanea conserva il controllo del processo, la razionalità del sistema e la continuità del dato, e li organizza in modo da rendere la differenziazione strutturalmente sostenibile[18]. In questa condizione la mass customization diventa una premessa teorica per i passaggi successivi dedicati alla produzione, alla costruzione e ai casi sperimentali.[1]

1 Pine (1993)
2 Naboni, Paoletti (2015)
3 Herbert (1984)
4 Russell (2005)
5 Forty (2000)
6 Frampton (1995)
7 Pine (1993)
8 Menges, Ahlquist (2011); Kolarevic (2004)
9 Bock, Linner (2015)
10 Naboni, Paoletti
11 Marble (2012)
12 Menges (2015)
13 Mostafavi, Kemper, Du (2019)
14 Adel
15 Bock, Linner
16 Pine; Naboni, Paoletti
17 Adel; Leder et al. (2019)
18 Bock, Linner; Pine

4.2 PROCESSI DI FABBRICAZIONE DIGITALE E ROBOTICA

La trasformazione contemporanea della produzione architettonica si fonda su un passaggio decisivo: il superamento della separazione tra dominio del progetto e dominio della fabbricazione[1]. Per lungo tempo, la definizione formale e la realizzazione materiale dell'opera hanno operato come momenti distinti, organizzati secondo una sequenza nella quale il progetto precedeva la produzione e la guidava dall'esterno. La fabbricazione digitale modifica profondamente questa condizione, poiché introduce un ambiente operativo nel quale la computazione non si limita a rappresentare l'oggetto, ma partecipa direttamente alla sua costruzione materiale[2]. Il modello digitale smette così di essere soltanto supporto di descrizione e diventa interfaccia attiva tra forma, materia, dati di macchina e processo esecutivo.

La fabbricazione digitale può essere definita come l'insieme dei processi attraverso cui l'informazione di progetto viene convertita in istruzioni operative destinate a sistemi di produzione a controllo digitale[3]. Il suo rilievo riguarda certo la precisione esecutiva e la possibilità di realizzare geometrie complesse, ma soprattutto la riorganizzazione del rapporto tra concezione e realizzazione. La produzione perde il carattere di fase finale e subordinata e rientra direttamente nella definizione del progetto[4]. La possibilità di articolare la materia, governare differenze locali, controllare tolleranze e programmare sequenze di lavorazione introduce così una logica in cui progetto e fabbricazione si definiscono reciprocamente. È su questo passaggio che la nozione di processo cyber-physical acquista reale consistenza[5]. In questi sistemi, processi computazionali e processi fisici agiscono in modo integrato, collegati da reti di comunicazione, dispositivi di monitoraggio, strutture di controllo e cicli di feedback che rendono continuo lo scambio tra dato e operazione materiale[6]. La fabbricazione digitale, quindi, supera la

semplice automazione della macchina e si configura come un ambiente produttivo in cui dominio digitale e dominio fisico interagiscono attraverso sensing, elaborazione, controllo e adattamento[7]. Il processo produttivo viene così organizzato come un sistema aperto, capace di acquisire dati, monitorare condizioni operative e restituire informazioni utili alla regolazione del proprio funzionamento.

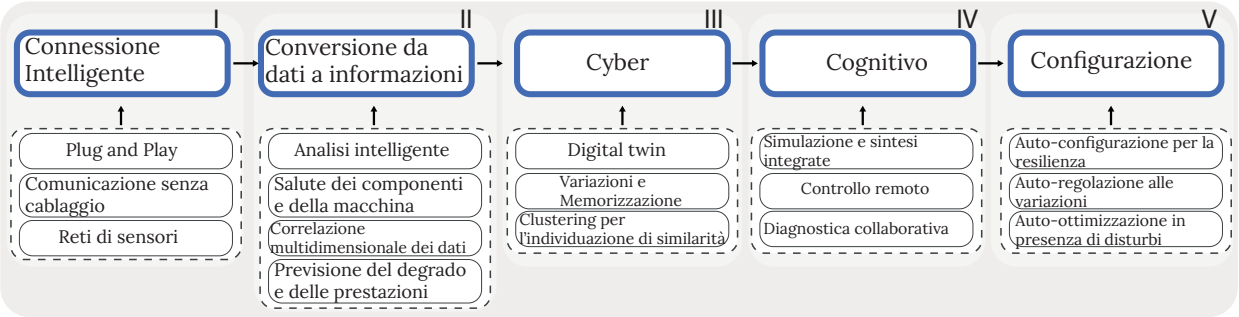


Figura 4.3
Processo cyber-physical e integrazione tra dominio digitale e dominio fisico. Schema concettuale che sintetizza il passaggio dalla progettazione digitale alla produzione materiale, evidenziando il ruolo di dati, monitoraggio, controllo e feedback.
Fonte: elaborazione dell'autore su letteratura relativa ai cyber-physical systems e alla digital fabrication. Lee,J.,Bagheri, B. &Kao,H.-A.A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing letters 3, 18–23 (2015).

La robotica costituisce l'espressione più avanzata di questa trasformazione. A differenza delle macchine dedicate, progettate per ripetere una singola operazione entro assetti fortemente stabilizzati, i sistemi robotici introducono un grado di flessibilità e programmabilità particolarmente adatto alla produzione architettonica contemporanea. Il loro interesse risiede nella possibilità di mettere in relazione la variabilità del progetto con la precisione del processo industriale, rendendo possibile la lavorazione di componenti differenziati senza perdere il controllo del dato, la ripetibilità delle operazioni e la continuità della catena produttiva. In questo senso, la robotica va letta come una riorganizzazione adattiva della fabbricazione digitale.

La configurazione di un processo robotico dipende infatti da una relazione stretta tra braccio meccanico, utensile, supporti, componente da produrre e traiettoria pianificata[10]. L'operazione non dipende più dalla sola macchina, ma dall'intero sistema che connette geometria, materiale, sequenza operativa e setup di produzione[11]. La fabbricazione robotica agisce quindi come parte di un processo proget-

tato, nel quale il modo di produrre incide direttamente sul modo di concepire il componente. La logica costruttiva, la preparazione dei supporti, la definizione del toolpath e la gestione della materia entrano nella definizione del progetto fin dalle fasi iniziali.
La rilevanza della robotica deriva anche dalla possibilità di integrare in modo più stretto progettazione parametrica, dati di fabbricazione e controllo operativo[12]. La produzione architettonica entra così in una fase in cui il componente cessa di essere pensato come elemento standard da replicare e viene definito come esito di un processo informato, capace di collegare parametri, vincoli, caratteristiche materiali e istruzioni di macchina entro un quadro coordinato. Ne segue una ridefinizione dell'intero processo produttivo, che da sequenza lineare tende a configurarsi come un sistema continuo, insieme informativo e materiale.

Alla luce di queste considerazioni, i processi di fabbricazione digitale e robotica possono essere letti come il punto di convergenza tra progetto, materiale, macchina e controllo. Essi esprimono una diversa concezione della produzione architettonica, nella quale la costruzione del componente dipende da una relazione sempre più stretta tra ambiente digitale e ambiente fisico[13]. Su questo terreno si innesta il capitolo successivo, dedicato al ruolo specifico della fabbricazione robotica nella trasformazione del processo produttivo, con attenzione alle sue logiche operative, alle tipologie di lavorazione e alla sua capacità di riorganizzare il rapporto tra modello, macchina e realizzazione.

---

1 Achim Menges, "Fusing the Computational and the Physical: Towards a Novel Material Cultu re", Architectural Design, 85(5), 2015, pp. 8–15.
2 Achim Menges, "The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Con struction", Architectural Design, 85(5), 2015, pp. 28–33.
3 Marta Gil Pérez, Integrative Structural Design Methods for Non-standard Buildings, sez. 2.4.2.
4 Ivi.
5 Shalinee K. Khaitan, James D. McCalley, "Design techniques and applications of cyberphysi cal systems: A survey", IEEE Systems Journal, 9, 2014, pp. 350–365.
6 Jay Lee, Behrad Bagheri, Hung-An Kao, "A cyber-physical systems architecture for industry

Aspetti	*Macchina Dedicata*	*Sistema robotico programmabile*
Logica operativa	*Esecuzione ripetitiva di una singola lavorazione*	*Adattamento a operazioni e componenti differenti*
Flessibilità	*Limitata*	*Elevata*
Relazione con il modello	*Indiretta*	*Elevata attraverso dati e toolpath*
Variabilità del componente	*Ridotta*	*Gestibile entro workflow controllati*
Integrazione con il processo	*Parziale*	*Continua tra progetto, macchina e produzione*

Tabella 10
Macchina dedicata e sistema robotico programmabile a confronto
Confronto tra la logica dell'automazione rigida con quella della fabbricazione robotica, evidenziando il passaggio da sistemi dedicati alla produzione ripetitiva a sistemi programmabili capaci di gestire componenti differenziati.

4.0-based manufacturing systems", Manufacturing Letters, 3, 2015, pp. 18–23.

7 Raj Rajkumar, Insup Lee, Lui Sha, John Stankovic, "Cyber-physical systems: The next compu ting revolution", Proceedings of the 47th Design Automation Conference, 2010, pp. 731–736.

8 Marta Gil Pérez, Integrative Structural Design Methods for Non-standard Buildings, sez. 2.5.1.

9 Thomas Bock, Thomas Linner, Robotic Industrialization: Automation and Robotic Technolo gies for Customized Component, Module, and Building Prefabrication, Cambridge University Press, New York, 2015.

10 Marta Gil Pérez, Integrative Structural Design Methods for Non-standard Buildings, sez. 2.5.1.

11 Ivi.

12 Lauren Vasey, Robotic Building as Integration of Design-to-Robotic-Production and -Operation, sez. 2.2; Achim Menges, "The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction", cit.

13 Achim Menges, "Fusing the Computational and the Physical: Towards a Novel Material Cul ture", cit.; Lauren Vasey, Robotic Building as Integration of Design-to-Robotic-Production and - Operation, sez. 2.2.

4.2.1 FABBRICAZIONE ROBOTICA E TRASFORMAZIONE DEL PROCESSO PRODUTTIVO

La fabbricazione robotica introduce una trasformazione sostanziale del processo produttivo perché sostituisce alla logica della macchina dedicata una struttura operativa programmabile, riconfigurabile e capace di lavorare componenti differenti entro un medesimo ambiente di controllo[1]. Nell'automazione industriale tradizionale, l'efficienza deriva dalla ripetizione di una singola lavorazione all'interno di una configurazione stabile, con utensili, traiettorie e componenti fortemente predeterminati[2]. In ambito architettonico, la produzione si confronta con geometrie variabili, tolleranze non uniformi, componenti non identici e sequenze costruttive che richiedono un grado più elevato di adattamento. In questo quadro, il robot industriale non viene impiegato come semplice sostituto di una macchina convenzionale, ma come piattaforma flessibile capace di assorbire variabilità senza interrompere la continuità del processo[3].

Il carattere distintivo della fabbricazione robotica risiede proprio in questa programmabilità. Il robot può cambiare utensile, modificare traiettoria, adattare la presa, ricalcolare la sequenza operativa e interagire con configurazioni produttive differenti in funzione del componente da realizzare[4]. Ne deriva una condizione nella quale la precisione industriale risiede nella capacità di governare differenze geometriche e costruttive entro protocolli di produzione coerenti. Il processo produttivo si organizza attorno a un sistema di regole che consente di produrre serie differenziate mantenendo controllo, accuratezza e prevedibilità. Questa trasformazione riguarda anche la natura stessa delle lavorazioni. Nella fabbricazione robotica, operazioni quali taglio, fresatura, foratura, deposizione, manipolazione, posizionamento e assemblaggio possono essere gestite all'interno di un ambiente unitario, nel quale la stessa macchina esegue

compiti diversi mediante la sostituzione dell'end-effector o la ridefinizione della traiettoria. Il punto decisivo consiste nella pluralità delle operazioni e nella loro integrazione entro un processo informato, dove la sequenza di lavorazione dipende dal rapporto tra geometria del componente, caratteristiche del materiale, ordine di montaggio e possibilità del sistema robotico. La robotic fabrication corrisponde a una diversa organizzazione del processo produttivo, nella quale la lavorazione viene definita insieme al componente.



Il setup produttivo diventa, per questa ragione, uno degli aspetti decisivi del processo, perché la prestazione del sistema deriva dalla configurazione complessiva che mette in relazione braccio meccanico, utensile, supporti di lavorazione, componente, materiale, sistema di riferimento e traiettoria operativa[6]. Ciascun elemento del setup incide sullo spazio delle soluzioni producibili, sulle tolleranze ottenibili, sulle modalità di connessione e sul tempo necessario per l'esecuzione del processo[7]. La fabbricazione robotica deve quindi essere letta come un sistema relazionale, nel quale il risultato finale emerge dall'interazione tra parametri di

macchina, logica costruttiva e organizzazione del componente. Ciò che conta non è soltanto "cosa" il robot fa, ma "come" l'intero sistema è configurato per rendere quella lavorazione possibile, stabile e ripetibile.

Da qui segue una conseguenza teorica rilevante: il componente prende forma in rapporto diretto al proprio modo di produzione[8]. La progettazione include il tipo di utensile, le possibilità di presa, i limiti cinematici del robot, le condizioni di accesso, le tolleranze ammissibili, l'ordine delle operazioni e le modalità di assemblaggio. La fabbricazione entra così nella definizione formale e costruttiva del progetto e partecipa alla sua impostazione fin dalle fasi iniziali. In questo senso, la robotic fabrication restringe il ricorso alla post-rationalization e orienta il controllo verso una progettazione che integra fin dall'origine vincoli e opportunità del sistema produttivo[9].
Il processo produttivo viene così riorganizzato come una sequenza nella quale modello digitale, dati di macchina, traiettorie, supporti e logiche di connessione si sviluppano in modo coordinato[10]. La forma viene progressivamente definita attraverso una negoziazione continua tra intenzione progettuale e fattibilità produttiva. Questo aspetto risulta particolarmente evidente quando la fabbricazione robotica entra in rapporto con componenti non standardizzati o con sistemi modulari assemblati spazialmente, nei quali il controllo della sequenza e delle condizioni di stabilità provvisoria diventa parte integrante dell'intelligenza del progetto[11]. In questi casi, la lavorazione e l'assemblaggio non rappresentano due fasi separate, ma due momenti di una medesima logica produttiva.

Il carattere trasformativo della robotic fabrication emerge con particolare evidenza nei processi di assemblaggio cooperativo. In questo ambito, il tema riguarda la definizione

preventiva dell'ordine delle operazioni, delle condizioni di stabilità, dei vincoli topologici tra i pezzi, delle possibilità di accesso del braccio robotico e delle soglie oltre le quali diventa necessario l'intervento umano[12]. La sequenza costruttiva entra così nella definizione stessa del componente. Le relazioni tra gli elementi, la loro orientazione, le modalità di connessione e la possibilità di mantenere la struttura in equilibrio durante il montaggio vengono quindi formalizzate come parametri di progetto, e rientrano direttamente nella sua impostazione anziché essere demandate a verifiche successive[13].

In questo passaggio emerge con chiarezza come la fabbricazione robotica operi come modalità di riorganizzazione dell'intero processo produttivo, oltre che come tecnologia di esecuzione. La macchina entra infatti in un sistema nel quale modello, materiale, componente e sequenza operativa vengono definiti secondo relazioni di reciproca dipendenza[14]. Il valore del robot risiede allora nella capacità di costruire continuità tra progetto e produzione, rendendo gestibile un'elevata variabilità insieme al mantenimento della precisione industriale. La produzione architettonica entra così in una fase in cui il controllo si fonda sulla formalizzazione di protocolli, setup e workflow capaci di governare componenti differenti entro un quadro coerente.
Questa condizione modifica anche il ruolo dell'operatore umano. Nei sistemi più avanzati, la relazione tra robot e operatore si configura come come redistribuzione delle competenze tra capacità meccanica, controllo situato, decisione e verifica[15]. Il robot gestisce con continuità operazioni ad alta precisione, compiti ripetitivi, manipolazioni complesse o mantenimento del componente in posizione; l'operatore interviene nelle fasi che richiedono adattamento contestuale, connessione, controllo qualitativo o interpretazione[16]. Alla luce di queste considerazioni, la fabbricazione robotica

può essere letta come un dispositivo di trasformazione del processo produttivo più che come una semplice applicazione di automazione avanzata. Essa ridefinisce la relazione tra modello, macchina, componente e sequenza, spostando il controllo dalla ripetizione del gesto alla configurazione dell'intero sistema[17]. Su questa base diventa possibile affrontare i temi della prototipazione, della prefabbricazione e delle logiche just-in-time, nei quali la robotic fabrication trova una delle sue applicazioni più coerenti e produttive.

Aspetti	*Automazione industriale tradizionale*	*Fabricazione robotica architettonica*
Logica di base	*Ripetizione singola operazione*	*Riconfigurazione del processo in funzione del componente*
Tipo di macchina	*Macchina dedicata*	*Robot programmabile multiuso*
Variabilità ammessa	*Ridotta*	*Elevata ma controllata*
Rapporto con il modello	*Sequenza prevalentemente lineare*	*Continuità tra progetto, dati di macchina e produzione*
Ruolo del setup	*Secondario e stabilizzato*	*Determinazione per il risultato e per lo spazio di soluzione*
Rapporto con l'assemblaggio	*Separato dalla produzione*	*Progressivamente integrato nella logica progettuale*
Esito produttivo	*Standardizzazione economica*	*Differenza controllata del componente*

Tabella 11
Automazione industriale tradizionale e fabbricazione robotica architettonica
La tabella mette in evidenza il passaggio da una logica di automazione rigida, fondata su macchine dedicate e processi ripetitivi, a una fabbricazione robotica nella quale programmabilità, adattamento e integrazione tra modello e produzione consentono di gestire componenti differenziati.

4.2.2 PRODUZIONE OFF-SITE, PROTOTIPAZIONE E LOGICHE JUST-IN-TIME

La produzione off-site definisce una configurazione del processo edilizio fondata sull'anticipazione delle lavorazioni, sulla scomposizione dell'opera in unità producibili e sul coordinamento tra fabbricazione, logistica e montaggio[1]. Componenti, elementi, sottoinsiemi e moduli vengono così inseriti entro una catena produttiva che comprende definizione geometrica, produzione in ambiente controllato, pre-assembly, trasporto, rilascio sequenziato e posa finale[2]. In questa configurazione il componente viene progettato come parte di un flusso operativo continuo. Geometria, interfacce, tolleranze, punti di presa, modalità di movimentazione e ordine di assemblaggio entrano nella definizione del sistema fin dalle fasi iniziali.
L'anticipazione delle lavorazioni trasferisce una quota di coordinamento dal cantiere a monte del processo[3]. La fabbrica assorbe attività che nel ciclo convenzionale restano distribuite tra produzione, consegna e messa in opera, con il risultato di aumentare la precisione esecutiva, la qualità del controllo e la prevedibilità della sequenza[4]. Questa intensificazione del controllo richiede però una maggiore definizione del componente e delle sue relazioni, poiché ogni unità deve risultare coerente con il proprio ciclo di produzione, con i limiti di trasporto, con le condizioni di sollevamento e con la propria posizione nella sequenza di montaggio[5]. La qualità del sistema dipende quindi dalla capacità di costruire corrispondenza tra il comportamento del componente e il flusso che ne governa la realizzazione.

Il coordinamento interfasico costituisce il nucleo tecnico di questa configurazione. Produzione, movimentazione, consegna e assemblaggio operano come segmenti reciprocamente dipendenti di uno stesso workflow[6].

La continuità del processo richiede una delivery methodology esplicita, supply chain strutturate, compatibilità tra programma di produzione e capacità di assorbimento del sito, nonché un design freeze più anticipato rispetto ai sistemi meno industrializzati[7]. In questo sistema, la produzione off-site produce vantaggi operativi precisi: riduzione dei tempi, migliore qualità di lavorazione, minore spreco di risorse, più alta sicurezza e, allo stesso tempo, aumenta la necessità di coordinamento, poiché l'efficienza del singolo segmento dipende dalla stabilità della catena che lo collega ai segmenti successivi[8].
Questa condizione assume maggiore evidenza quando il processo comprende operazioni di pre-assembly. L'unità prodotta fuori sito incorpora infatti requisiti costruttivi e condizioni di trasporto, criteri di movimentazione e vincoli di posa[9]. Il pre-assembly introduce una soglia ulteriore di integrazione: il componente entra nella sequenza produttiva già come oggetto logistico e costruttivo, portatore di relazioni che riguardano il proprio rilascio, la propria installazione e la propria compatibilità con l'ordine di montaggio. La precisione della fabbricazione si lega quindi direttamente alla precisione della sequenza.

Una configurazione produttiva di questo tipo richiede strumenti di verifica capaci di controllare la tenuta del sistema prima della sua applicazione a scala operativa. In questa funzione si colloca la **prototipazione**, intesa come dispositivo di validazione del workflow e delle sue condizioni di trasferibilità[10]. Mock-up, dimostratori e casi costruiti consentono di osservare il comportamento del processo in una forma materialmente verificabile, rendendo misurabili tolleranze, interferenze tra operazioni, stabilità della sequenza, qualità delle connessioni, coerenza tra dati di progetto e risultato costruito[11]. La prototipazione agisce quindi sul processo prima ancora che sull'oggetto. La sua efficacia risiede nella

possibilità di esplicitare le soglie critiche del sistema e di trasformarle in criteri di correzione.

La validazione prototipale costruisce conoscenza tecnica in forma cumulativa[12]. Ogni verifica consolida procedure, chiarisce i punti di controllo, corregge gli scarti tra previsione e comportamento operativo e aumenta l'affidabilità complessiva del workflow[13]. Il passaggio dalla ricerca alla pratica si organizza precisamente entro questa progressione: la sperimentazione definisce il sistema, il prototipo ne misura la tenuta, la reiterazione ne rafforza la stabilità, la stabilità ne consente il trasferimento. In questa prospettiva, la prototipazione svolge una funzione di infrastruttura metodologica, poiché prepara il processo a operare entro condizioni applicative più complesse senza perdere leggibilità né controllo.

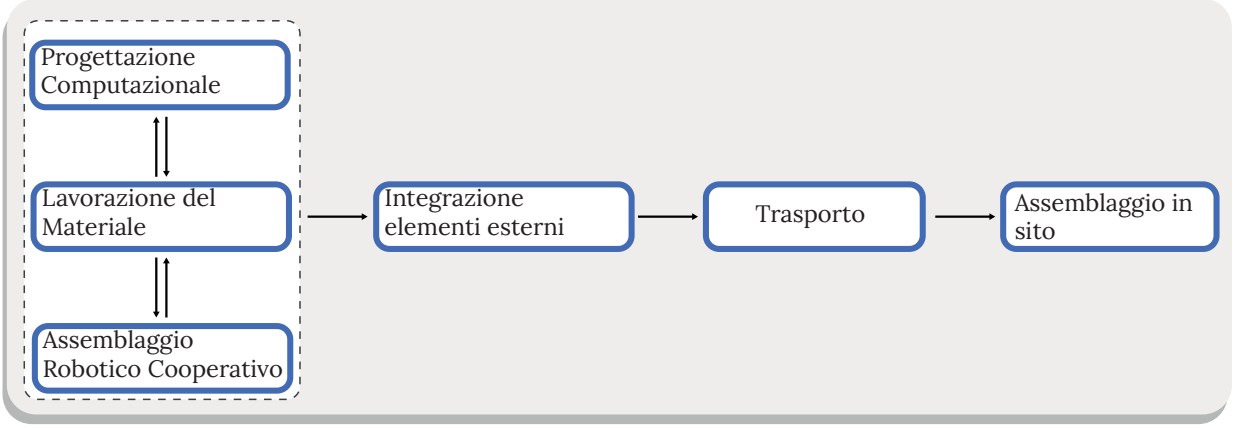


Figura 4.4
Coordinamento tra produzione off-site, logistica e assemblaggio in sito. Schema di processo che rappresenta la continuità tra fabbricazione del componente, pre-assembly, trasporto, rilascio sequenziato e montaggio finale. Fonte: elaborazione dell'autore, ispirata alla letteratura su off-site construction, modular construction e delivery coordination.

Il consolidamento del workflow costituisce a sua volta il presupposto per il coordinamento temporale tra produzione, logistica e montaggio. Su questa base si innestano le logiche **just-in-time**, che nel settore delle costruzioni assumono la forma di una sincronizzazione tra rilascio dei componenti, trasporto, finestra di consegna, disponibilità delle risorse di sollevamento e ordine di assemblaggio[14]. Il loro campo di azione riguarda la regolazione del flusso tra segmenti differenti della catena, con l'obiettivo di far arrivare elementi, materiali e informazioni nel momento in cui il segmento

successivo è effettivamente pronto a riceverli e integrarli[15]. La qualità del coordinamento temporale diventa quindi parte della qualità del processo produttivo.

Il coordinamento just-in-time richiede una configurazione precisa del processo. La catena di produzione, trasporto e montaggio deve essere coerente con la sequenza effettiva del progetto; i margini temporali e logistici devono essere calibrati in funzione delle condizioni operative; le informazioni sullo stato delle lavorazioni e delle consegne devono risultare accessibili e aggiornate[16]. In presenza di ritardi, variazioni di programma o difficoltà di consegna, l'efficacia del sistema dipende dalla capacità di distinguere le fasi che possono essere sincronizzate con elevata precisione da quelle che richiedono margini di assorbimento più ampi[17]. Trasferito alla produzione off-site, questo assetto implica che rilascio, trasporto e consegna dei componenti vengano definiti in rapporto diretto con la sequenza di montaggio, con le dipendenze tra le unità e con la reale capacità del sito di riceverle e assemblarle secondo il programma previsto[18].

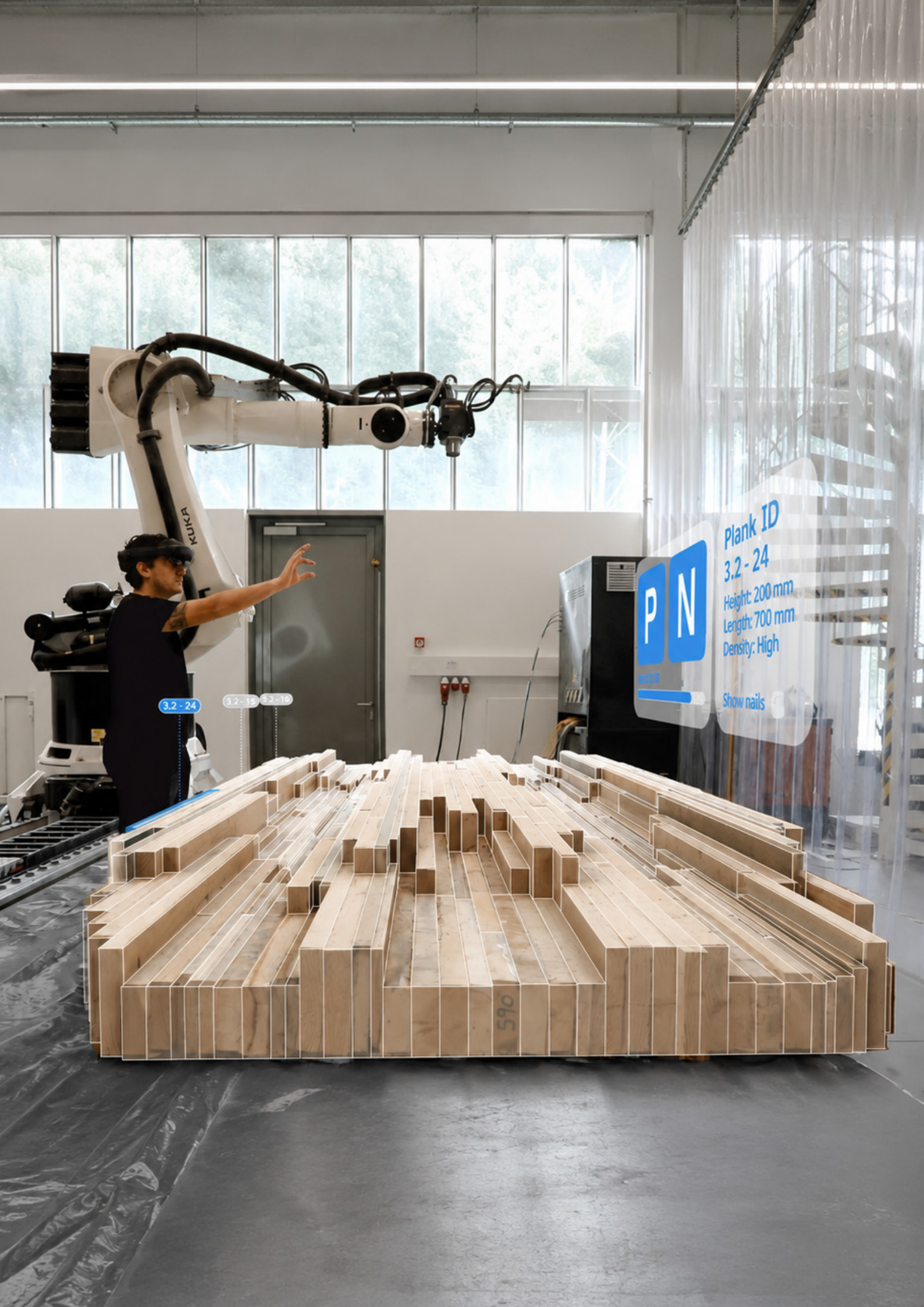
La logistica entra così nella struttura tecnica del processo. Il componente viene rilasciato in funzione della propria collocazione nella sequenza costruttiva e la continuità del workflow dipende dalla corrispondenza tra programma di produzione, disponibilità di trasporto, accessibilità del sito, ordine di posa e stato reale delle operazioni[19]. La produzione off-site e il coordinamento just-in-time convergono perciò in una stessa organizzazione del controllo: la prima anticipa e stabilizza la realizzazione dell'unità, il secondo ne regola il flusso verso il montaggio finale.

Produzione off-site, prototipazione e logiche just-in-time individuano dunque una configurazione coerente del processo produttivo. L'anticipazione delle lavorazioni costrui-

sce controllo. La validazione prototipale costruisce affidabilità. Il coordinamento just-in-time costruisce continuità tra fabbrica, logistica e assemblaggio[20]. Su questa base il tema della costruzione può essere affrontato come sviluppo ulteriore di una catena già organizzata, nella quale il montaggio entra in rapporto diretto con sistemi di controllo, supporti digitali e procedure collaborative.

Aspetti	*Produzione off-site convenzionale*	*Produzione off-site coordinata in logica just-in-time*
Definizione del componente	*Configurazione centrata sulla sola unità prodotta*	*Configurazione integrata con produzione, logistica e montaggio*
Rilascio	*Consegna per lotti o disponibilità*	*Consegna sequenziata in funzione dell'ordine di posa*
Ruolo della logistica	*Supporto operativo*	*Parte tecnica del workflow produttivo*
Coordinamento con il sito	*Parziale*	*Dipendenza diretta dalla capacità di assorbimento del montaggio*
Validazione	*Verifica locale o ex post*	*Validazione anticipata del workflow tramite prototipazione*
Criticità prevalenti	*Discontinuità tra fabbrica e sito*	*design freeze, supply chain, coordination, affidabilita informativa*

Figura 12
Produzione off-site e logiche just-in-time
La tabella confronta una produzione off-site intesa come anticipazione delle lavorazioni con una configurazione più avanzata, nella quale il rilascio dei componenti viene coordinato secondo logiche just-in-time in funzione della sequenza di montaggio e dell'interdipendenza tra fabbrica, trasporto e sito.


KUKA
3.2 - 24
3.2 - 19
3.2 - 18
P N
Plank ID
3.2 - 24
Height: 200 mm
Length: 700 mm
Density: High
Show nails
590

5 | PARTE QUINTA
COSTRUZIONE

5 COSTRUZIONE

La costruzione rappresenta la fase nella quale la precisione definita in sede progettuale e produttiva viene sottoposta a una verifica operativa continua, poiché componenti, sequenze, dati e istruzioni entrano in rapporto diretto con le condizioni effettive del sito[1]. In questo passaggio, il montaggio assume la forma di un processo informato, nel quale l'ordine delle operazioni, il posizionamento dei componenti, la disponibilità degli strumenti, la lettura dello stato di avanzamento e la capacità di adattamento concorrono alla definizione del risultato costruito[2]. La fase costruttiva si configura quindi come un ambiente di coordinamento ad alta densità tecnica, nel quale il valore del componente dipende dal modo in cui esso si integra entro una catena operativa già strutturata e costantemente aggiornata.

L'introduzione dei sistemi cyber-physical porta nel cantiere procedure di acquisizione dei dati, monitoraggio, diagnostica e supporto decisionale che connettono la dimensione fisica e quella informativa durante l'esecuzione[3]. Il processo costruttivo diventa così una sequenza misurabile, nella quale stati intermedi, posizionamento dei pezzi, velocità delle operazioni, condizioni del sistema e configurazione as-built vengono ricondotti a una stessa infrastruttura di controllo[4]. Il cantiere dispone così di una continuità più stretta tra previsione e verifica, tra montaggio pianificato e montaggio eseguito, tra configurazione di progetto e configurazione progressivamente costruita.

Questa trasformazione incide direttamente sulla natura dell'assemblaggio. La costruzione contemporanea, soprattutto nei casi in cui deriva da processi off-site e da componenti già definiti entro una catena produttiva coordinata, richiede una più stretta integrazione tra logica di montaggio, controllo delle tolleranze, capacità di allineamento e disponibilità dell'informazione operativa[5]. Il sito si configura

così come uno spazio di orchestrazione, nel quale operatori, robot, componenti e interfacce digitali partecipano alla medesima sequenza di azioni coordinate[6]. La qualità dell'esecuzione dipende dalla possibilità di mantenere leggibili le relazioni tra le operazioni e di distribuire istruzioni, conferme, stati e correzioni lungo l'intero processo di montaggio.

La collaborazione tra operatori e sistemi robotici definisce direttamente l'organizzazione del processo. Le procedure di human-robot collaboration descritte nei materiali di riferimento delineano un assetto nel quale il robot è impiegato nelle operazioni ad alta precisione, nella movimentazione, nel posizionamento e nelle attività ripetitive, mentre l'operatore interviene nelle fasi che richiedono controllo fine, decisione contestuale, verifica e manipolazione[7]. Il cantiere accresce così la propria capacità operativa attraverso una distribuzione differenziata delle competenze, sostenuta da un'infrastruttura digitale capace di coordinare i passaggi tra agente umano, macchina e componente. La costruzione viene così definita come un processo collaborativo esplicito, nel quale la sequenza di montaggio, il ruolo dei soggetti coinvolti e il flusso delle informazioni sono formalizzati entro una struttura unitaria.

Su questa base si innestano le piattaforme di digital twin di processo e di componente, che consentono di associare ogni elemento costruito alla propria identità informativa, alla propria posizione nella sequenza e al proprio stato operativo[8]. Il controllo del processo costruttivo si sviluppa allora attraverso una lettura sincronizzata tra sistema fisico e sistema digitale, rendendo possibili monitoraggio, diagnostica, tracciabilità e aggiornamento continuo della configurazione costruita[9]. Il valore di questo assetto risiede nella possibilità di osservare la costruzione come una sequenza verificabile di stati e relazioni, capace di collegare montag-

gio, controllo e memoria tecnica dell'opera.
Le tecnologie XR e, in particolare, i sistemi di Mixed Reality, completano questa evoluzione poiché introducono interfacce operative che trasferiscono nello spazio fisico istruzioni, coordinate, stati di avanzamento, identificazione dei componenti e informazioni di assemblaggio[10]. Il montaggio acquisisce così un supporto contestuale continuo, capace di rendere accessibili dati e sequenze direttamente nel luogo dell'azione. La relazione tra rappresentazione e operazione si intensifica: ciò che deve essere posato, verificato o connesso compare entro il campo visivo dell'operatore come parte attiva del processo costruttivo. L'interfaccia digitale diventa quindi una componente del montaggio, poiché orienta il gesto, rafforza la leggibilità della sequenza e migliora il coordinamento tra soggetti, componenti e sistema informativo.

Alla luce di queste condizioni, la costruzione si presenta come prosecuzione coerente della filiera definita nella parte produttiva. La produzione anticipata organizza il componente e la sua sequenza di rilascio; il cantiere ne governa il montaggio attraverso collaborazione, monitoraggio e interazione assistita[11]. Il presente capitolo sviluppa questa continuità articolandola in tre direzioni: il cantiere aumentato come ambiente di assemblaggio collaborativo; il digital twin come dispositivo di controllo del processo costruttivo; i sistemi XR come interfacce operative per il montaggio e la gestione delle istruzioni in sito[12]. In questa progressione la costruzione assume la forma di un processo tecnico integrato, nel quale esecuzione materiale e infrastruttura informativa operano come parti di uno stesso sistema.

---

1 Kunic, Kramberger, Naboni (2021)
2 Kritzinger et al. (2018)
3 Malik, Brem (2021)
4 Kunic, Naboni, Kramberger, Schlette (2021)
5 Hansen, Kunic, Naboni (2021)

6 Atanasova et al. (2020)
7 Kunic, Naboni, Kramberger, Schlette (2021); Atanasova et al. (2020)
8 Kritzinger et al. (2018); Malik, Brem (2021)
9 Kunic, Kramberger, Naboni (2021); Malik, Brem (2021)
10 Hughes, Osterlund, Larsen (2021); Kyjanek et al. (2019); Settimi, Gamerro, Weinand (2022)
11 Kunic, Naboni, Kramberger, Schlette (2021); Hughes, Osterlund, Larsen (2021)
12 Atanasova et al. (2020); Kunic, Kramberger, Naboni (2021); Kritzinger et al. (2018); Hughes, Osterlund, Larsen (2021)

5.1 ASSEMBLAGGIO COLLABORATIVO UOMO–ROBOT

L'assemblaggio collaborativo uomo–robot configura un assetto costruttivo nel quale operatore e sistema robotico agiscono all'interno della stessa sequenza di montaggio, condividendo spazio di lavoro, informazione operativa e responsabilità esecutive secondo una distribuzione differenziata dei compiti[1]. In questo quadro, la collaborazione risponde a una precisa articolazione tecnica: il robot opera nelle azioni che richiedono precisione, ripetitività e regolarità geometrica, mentre l'operatore interviene nelle fasi che richiedono adattamento situato, controllo fine, verifica immediata e manipolazione sensibile del componente[2]. Il processo costruttivo si organizza così come una catena coordinata di azioni complementari, nella quale la qualità del risultato dipende dalla chiarezza della sequenza, dalla leggibilità delle istruzioni e dalla capacità di mantenere allineati gesto umano, movimento robotico e stato del sistema assemblato.

Nel settore delle costruzioni, l'assemblaggio collaborativo uomo–robot incontra condizioni operative particolarmente complesse, segnate da materiali variabili, tolleranze differenziate, accessibilità discontinua e situazioni di montaggio che richiedono aggiustamenti continui durante l'esecuzione[3]. La collaborazione tra operatore e robot permette così di unire la precisione meccanica del sistema robotico alla capacità umana di interpretare il contesto, correggere micro-scostamenti, gestire interferenze e verificare il comportamento del componente nella fase di posa[4]. L'efficacia del sistema dipende dalla possibilità di organizzare queste competenze entro un workflow esplicito, nel quale compiti, tempi, stati intermedi e soglie di passaggio risultano definiti con chiarezza.

I materiali analizzati mostrano che questo principio può essere tradotto in procedure di montaggio nelle quali robot e

operatore condividono una stessa area collaborativa e partecipano a una sequenza unica di presa, posizionamento, allineamento e connessione degli elementi[5]. Nei workflow di re-assembly robotico, i robot eseguono operazioni di pick-and-place, localizzazione dei target, mantenimento in posizione e assistenza alla connessione, mentre l'operatore interviene nelle fasi di serraggio, verifica, correzione e completamento della giunzione[6]. La collaborazione si struttura così come una procedura di montaggio a responsabilità distribuite, nella quale il robot stabilizza il processo e l'operatore ne controlla l'esecuzione locale.

Questo assetto produce una conseguenza rilevante sul piano della progettazione del processo. L'assemblaggio collaborativo richiede che la sequenza costruttiva sia formalizzata prima dell'esecuzione, poiché presa, ordine di posa, stabilità temporanea, accessibilità dell'utensile e tempo di intervento umano devono risultare compatibili con il comportamento del sistema robotico e con la logica costruttiva del componente[7]. La collaborazione entra così nella definizione stessa del workflow. Il componente, la sua connessione e la sua posizione nella sequenza di montaggio vengono quindi definiti in funzione della cooperazione tra operatore e macchina.

Le sperimentazioni condotte su sistemi riconfigurabili in legno mostrano con chiarezza questo passaggio. Il robot opera come supporto attivo al montaggio attraverso utensili multifunzione, sistemi di visione, target di riconoscimento e procedure di comunicazione collegate al modello computazionale; l'operatore agisce sulle fasi di inserimento, serraggio, verifica dell'allineamento e conferma dell'operazione completata[8]. L'elemento costruttivo diventaparte di un ambiente cyber-physical nel quale dati di progetto, coordinate di assemblaggio, identificazione del pezzo e stato dell'azione vengono costantemente messi in relazione. La collaborazione uomo–robot coincide, in questo senso, con una forma

di orchestrazione tecnica del montaggio.

Nei casi in cui la collaborazione è assistita da interfacce di Mixed Reality e da sistemi di tracciabilità del componente, il processo acquista un grado più elevato di coordinamento informativo. In questi contesti, l'operatore riceve direttamente nello spazio di montaggio istruzioni contestuali, posizione dei fori, ordine delle operazioni, identificazione dei bulloni e stato del componente[9]. Il robot mantiene o trasferisce il pezzo, mentre l'operatore esegue la connessione guidato da un ambiente informativo sovrapposto al sistema fisico. La qualità del processo collaborativo dipende così da una base condivisa di dati, stati e istruzioni, che rende più chiara la sequenza operativa e più controllabile il coordinamento tra i soggetti coinvolti.

In questa configurazione, il cantiere aumentato assume i tratti di un ambiente di assembly orchestration nel quale il valore della collaborazione deriva dalla precisione con cui vengono coordinate le relazioni tra componente, operatore, robot e interfaccia digitale[10]. L'assemblaggio collaborativo uomo–robot rappresenta quindi una soglia centrale della costruzione contemporanea: da un lato mantiene il controllo fine e l'adattabilità dell'azione umana; dall'altro introduce precisione, ripetibilità e capacità di supporto meccanico entro procedure di montaggio sempre più formalizzate. Su questa base diventa possibile affrontare il tema successivo dei processi adattivi e semi-autonomi, nei quali il workflow non viene soltanto eseguito in modo collaborativo, ma può essere regolato e corretto durante l'azione.

---

1 ISO 15066 (2016)
2 Vasey (2021)
3 Vasey (2021)
4 Vasey (2021)
5 Angeletti (2022)
6 Angeletti(2022)
7 Hansen, Kunic, Naboni (2021)
8 Kunic, Naboni, Kramberger, Schlette (2021);
9 Angeletti; Kyjanek et al. (2019); Hughes, Osterlund, Larsen (2021)
10 Vasey; Atanasova et al. (2020)

5.1.2 PROCESSI ADATTIVI E SEMI-AUTONOMI IN CANTIERE

I processi adattivi e semi-autonomi introducono nel cantiere una struttura operativa in cui la sequenza di montaggio viene definita a livello strategico e regolata, sul piano esecutivo, in funzione dello stato reale del sistema[1]. In questo assetto, modello digitale, dati di processo, componenti fisici, sensori e interfacce di controllo operano entro una medesima infrastruttura cyber-physical, capace di mantenere allineati previsione, esecuzione e verifica[2]. Il cantiere assume così una configurazione processuale più articolata: il montaggio procede attraverso una correlazione continua tra stato del componente, posizione nella sequenza, disponibilità dei dati e condizioni operative del sistema.

Il carattere adattivo del processo riguarda anzitutto la regolazione della sequenza. L'ordine delle operazioni viene definito in rapporto alle dipendenze costruttive del sistema e, durante l'esecuzione, può essere aggiornato entro limiti controllati in funzione di tolleranze, scostamenti geometrici, disponibilità dei componenti, stato dell'assemblaggio e feedback provenienti dal dominio fisico[3]. La sequenza conserva quindi la propria funzione ordinatrice e, allo stesso tempo, acquisisce una capacità di risposta situata. La qualità del processo dipende dalla possibilità di governare questa duplice condizione: la stabilità della struttura logica generale e l'adattabilità locale delle operazioni.
Il carattere semi-autonomo riguarda invece la distribuzione del controllo. Alcune azioni vengono eseguite dal sistema robotico secondo parametri già formalizzati; altre richiedono supervisione, validazione o correzione da parte dell'operatore[4]. L'autonomia cresce così per livelli, entro una gerarchia che comprende sensing, data acquisition, motion control, verifica dello stato e conferma delle operazioni cri-

tiche. In questo quadro, il cantiere non viene organizzato come ambiente di automazione totale, ma come sistema di coordinamento nel quale macchina e operatore intervengono con competenze differenti su uno stesso workflow.

I materiali analizzati mostrano che questa configurazione si fonda sulla continuità tra feedback e controllo. Sistemi di visione, target di riconoscimento, sensori tattili, dati di forza/coppia e interfacce di tracking consentono di acquisire informazioni sul comportamento del processo durante l'azione e di tradurle in correzioni o aggiornamenti della sequenza. Il valore di questi dispositivi consiste nella possibilità di trasformare il dato operativo in regolazione del montaggio. Il processo acquisisce quindi una capacità di auto-osservazione che rafforza l'affidabilità dell'esecuzione e rende leggibili stati intermedi, margini di scostamento e condizioni di avanzamento.
All'operatore, nei processi semi-autonomi, spettano il controllo dei passaggi critici, la conferma degli stati, la gestione delle eccezioni, l'interpretazione delle condizioni locali e l'intervento nelle situazioni che richiedono adattamento fine o decisione contestuale[6].

Al sistema robotico corrispondono invece continuità, precisione e ripetibilità nelle operazioni maggiormente formalizzate. L'efficacia del workflow dipende dalla chiarezza con cui queste competenze vengono distribuite e ricondotte a una stessa struttura informativa. La semi-autonomia definisce così una modalità di organizzazione del processo, prima ancora che un livello tecnico dell'automazione.
Questa logica emerge con chiarezza nei processi cyber-physical di assemblaggio riconfigurabile, nei quali modello computazionale, dati del componente, istruzioni di montaggio e stato dell'azione vengono mantenuti sincronizzati durante l'esecuzione[7]. In questi workflow, il componente viene iden-

tificato, localizzato e associato alla propria posizione nella sequenza; il sistema aggiorna istruzioni, controlla compatibilità tra i passaggi e mette in relazione ambiente digitale e spazio fisico dell'assemblaggio[8]. L'adattamento del processo dipende da questa infrastruttura di continuità: quanto più il sistema è in grado di leggere il proprio stato, tanto più può regolare le operazioni entro un quadro verificabile.

Nei contributi dedicati a robot learning, tactile sensing, vision-based guidance e force/torque feedback, una parte delle competenze esecutive viene trasferita al sistema tecnico attraverso procedure di apprendimento, dimostrazione o calibrazione sensoriale[9]. In cantiere, questo passaggio amplia il campo dei processi semi-autonomi, perché rende operabili anche azioni finora legate in larga misura all'esperienza diretta dell'operatore. Il risultato consiste in una formalizzazione parziale del sapere umano entro un sistema capace di riprodurre, assistere o verificare alcune prestazioni esecutive.

I processi adattivi e semi-autonomi definiscono così una configurazione del cantiere in cui esecuzione, controllo e informazione operano come livelli simultanei di uno stesso sistema[1□]. La costruzione si organizza attraverso sequenze dipendenti dallo stato del processo, interfacce di supervisione, dati aggiornati e capacità di regolazione distribuite tra macchina e operatore. Su questa base, il passaggio verso monitoraggio, diagnostica e digital twin risulta diretto, perché l'adattamento del workflow durante l'azione richiede un'infrastruttura informativa capace di leggere, registrare e interpretare lo stato reale del sistema costruttivo.

5.2 DIGITAL TWIN E CONTROLLO DEL PROCESSO COSTRUTTIVO

La costruzione assistita da sistemi cyber-physical produce una quantità crescente di dati relativi a componenti, sequenze, stati intermedi, feedback di montaggio e configurazione as-built. Il controllo del processo dipende dalla capacità di registrare, organizzare e interpretare tali dati entro una struttura coerente, capace di collegare dominio fisico e dominio informativo lungo l'intera esecuzione[1]. In questo quadro, il digital twin opera come infrastruttura di coordinamento, poiché raccoglie le informazioni provenienti dal cantiere, le connette al modello computazionale e restituisce una rappresentazione aggiornata dello stato del sistema, utile al monitoraggio, alla diagnostica e al supporto decisionale[2]. Questa impostazione assegna al dato una funzione operativa precisa. La costruzione genera informazioni relative alla posizione dei componenti, all'ordine delle operazioni, allo stato delle connessioni, ai feedback di forza e coppia, all'identificazione dei pezzi e all'avanzamento del montaggio. Il controllo del processo dipende dalla possibilità di tradurre tali informazioni in una lettura continua dello stato del sistema, così da rendere visibili scostamenti, conferme, dipendenze tra passaggi e condizioni di avanzamento[3]. Il digital twin di processo consente questa continuità, perché rende disponibile una costruzione virtuale parallela dello stato as-built e organizza i dati in una forma interpretabile durante l'esecuzione[4].

Nel cantiere aumentato, la continuità informativa si articola su più livelli. Alla scala locale, i dati provenienti da sensori, sistemi di visione, target di riconoscimento e interfacce operative sostengono il controllo delle singole azioni di montaggio. Alla scala di sistema, gli stessi dati confluiscono in ambienti di visualizzazione e diagnostica capaci di restituire lo stato complessivo del processo, integrare informazioni distribuite e supportare decisioni operative durante l'esecuzione[5]. Il controllo del processo costruttivo assume così una struttura gerarchica, nella quale acquisizione, let-

tura, aggiornamento e interpretazione operano entro uno stesso ambiente informativo. In questo contesto, il Material Digital Twin estende il concetto di digital twin dal sistema al singolo componente. A ciascun elemento può essere associata un'identità digitale persistente, collegata a geometria, materiale, prestazioni, posizione nella sequenza, dati di fabbricazione, dati di assemblaggio e informazioni d'uso. Il componente entra così in una catena informativa che connette progettazione computazionale, fabbricazione robotica, assemblaggio, esercizio e disassemblaggio□. La tracciabilità assume quindi un valore tecnico diretto, poiché consente di identificare il pezzo, localizzarlo nella sequenza, verificarne lo stato e mettere in relazione la sua storia materiale con le decisioni operative del cantiere.I workflow che integrano Mixed Reality, robotica e material tracking mostrano questa possibilità con chiarezza. Istruzioni di assemblaggio, coordinate, posizione dei fori, tipologia dei bulloni, dati identificativi del blocco e stato del componente possono essere proiettati nello spazio fisico e mantenuti sincronizzati con il modello digitale e con il backend di processo[7]. Il controllo del cantiere si configura così come interazione continua tra componente fisico, interfaccia operativa e infrastruttura dati. La costruzione diventa leggibile in tempo reale, con effetti diretti su monitoraggio, diagnostica e supporto decisionale. Su queste basi, il presente paragrafo introduce il digital twin come dispositivo centrale del controllo del processo costruttivo. Il sottocapitolo 5.2.1 approfondisce monitoraggio, diagnostica e decision making, il sottocapitolo 5.2.2 esamina invece il Material Digital Twin e la tracciabilità dei componenti, chiarendo come identità digitale, dataset di processo e continuità informativa rendano possibile una costruzione più controllata, più trasparente e più coerente con l'intera filiera progettuale e produttiva[8].

---

1 Kritzinger et al. (2018)
2 Malik, Brem (2021); Kritzinger et al. (2018)
3 Kunic, Kramberger, Naboni (2021)
4 Malik, Brem (2021)
5 Vasey
6 Kunic, Naboni, Kramberger, Schlette (2021); Kritzinger et al. (2018)
7 Hughes, Osterlund, Larsen (2021); Settimi, Gamerro, Weinand (2022); Kunic, Naboni, Kramberger, Schlette (2021)
8 Kritzinger et al. (2018); Kunic, Kramberger, Naboni (2021)

5.2.1 MONITORAGGIO, DIAGNOSTICA E DECISION MAKING

Il monitoraggio del processo costruttivo consiste nell'acquisizione continua di dati relativi a componenti, operazioni, stati di avanzamento e condizioni di montaggio[1]. In ambiente cyber-physical, questi dati provengono da sistemi di visione, target di riconoscimento, sensori, QR code, backend di processo e interfacce operative. Il monitoraggio costruisce una lettura aggiornata del processo in corso. Ogni operazione viene così riferita a un componente identificato, a un punto della sequenza e a uno stato esecutivo verificabile. La diagnostica interviene su questo livello informativo e ne struttura l'interpretazione[2]. Consente di individuare scostamenti tra sequenza prevista e sequenza eseguita, errori di identificazione del componente, passaggi incompleti, ritardi, incompatibilità locali e condizioni che richiedono una regolazione del workflow. Il dato di processo viene così riportato a uno stato leggibile del sistema. La diagnostica rende quindi leggibile il montaggio attraverso indicatori, conferme e anomalie.

Il decision making utilizza questa lettura per orientare l'azione successiva[3]. Le informazioni prodotte da monitoraggio e diagnostica consentono di confermare un passaggio, correggere una sequenza, richiamare istruzioni specifiche, verificare la posizione del componente, aggiornare lo stato del backend o gestire eccezioni locali. La decisione operativa dispone in questo modo di una base informativa esplicita. Il controllo del cantiere si organizza così come un passaggio continuo tra acquisizione, interpretazione e regolazione. Nei processi di assemblaggio assistito, questo assetto si traduce in una corrispondenza diretta tra identità digitale del componente, stato della sequenza e azione esecutiva[4]. Il sistema riconosce il pezzo, ne legge la posizione nel workflow, associa a tale posizione le istruzioni operative e ag-

giorna il processo una volta conclusa l'operazione. La qualità del controllo dipende dalla precisione con cui questa catena viene mantenuta. Il monitoraggio assicura la continuità del dato, la diagnostica verifica coerenza e criticità, il decision making regola il montaggio sulla base dello stato rilevato.
Il controllo del processo costruttivo può quindi essere descritto come una struttura tecnica articolata in tre livelli: osservazione dello stato, interpretazione delle condizioni operative, regolazione della sequenza[1]. Su questa base si prepara il passaggio al Material Digital Twin e alla tracciabilità del componente, dove il dato di processo si estende dall'evento esecutivo alla storia tecnica dell'elemento lungo l'intera catena costruttiva.

1 Lauren Vasey, Robotic Building as Integration of Design-to-Robotic-Production and -Operation, § 5.1 Global Monitoring, System Diagnostics, and Decision Making at Run-Time.
2 Ivi.
3 Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufactu ring: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022.
4 Angeletti, § 2.4.3 Human-Robot Collaborative Assembly with Mixed Reality (MR) and Material Digital Twin (MDT).
5 Malik, A. A., & Brem, A. (2021). Digital Twins for Collaborative Robots: A case study in human-robot interaction. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 68, 102092; Lauren Vasey, § 5.1, cit.

5.2.2 MATERIAL DIGITAL TWIN E TRACCIABILITÀ DEI COMPONENTI

Il Material Digital Twin introduce nel processo costruttivo una struttura informativa centrata sul singolo componente, alla quale vengono associati dati geometrici, materici, prestazionali, produttivi e operativi[1]. Ogni elemento viene identificato attraverso un codice univoco e collegato a un dataset che ne descrive caratteristiche fisiche, parametri di lavorazione, posizione nella sequenza di montaggio e stato operativo. Il componente assume così una identità digitale persistente, capace di accompagnarlo lungo le diverse fasi del processo.

La tracciabilità deriva da questa corrispondenza tra elemento fisico e struttura dati. Il riconoscimento del componente consente di richiamare informazioni specifiche, verificarne la collocazione nella sequenza, controllare la correttezza dell'operazione prevista e aggiornare lo stato del workflow[2]. Il dato associato al pezzo acquista quindi un valore operativo diretto, perché collega identificazione, montaggio e controllo del processo entro una stessa infrastruttura informativa.

La struttura del Material Digital Twin si organizza per livelli. Un primo livello raccoglie i dati di identità del componente: geometria, dimensioni, materiale, sezione e posizione nel sistema[3]. Un secondo livello comprende i dati prestazionali, come caratteristiche meccaniche, utilizzazione strutturale e condizioni rilevanti per l'impiego successivo. Un terzo livello riguarda la fabbricazione e registra metodo di lavorazione, topologia produttiva e parametri macchina. Un quarto livello descrive il montaggio attraverso coordinate, orientamento, connessioni, bulloni, ordine delle operazioni e stato della posa. Il Material Digital Twin si configura così

come archivio operativo del componente e, allo stesso tempo, come interfaccia tra elemento fisico e processo.
Nei workflow di assemblaggio assistito, questa struttura informativa entra direttamente nella sequenza esecutiva. Il componente viene riconosciuto mediante tag o QR code, associato al modello digitale e collegato alle istruzioni di montaggio restituite attraverso il backend di processo e le interfacce operative[4]. Coordinate dei fori, tipo di connessione, ordine dei passaggi e stato del componente vengono aggiornati in rapporto all'avanzamento effettivo delle operazioni. La tracciabilità si sviluppa quindi come scambio continuo tra identificazione, istruzione, conferma e aggiornamento.

Questo assetto rafforza il controllo del montaggio soprattutto nei processi con componenti differenziati, connessioni variabili e sequenze articolate. La disponibilità di una identità digitale persistente migliora la leggibilità del workflow, riduce errori di selezione e consente una verifica puntuale della corrispondenza tra componente, operazione prevista e stato della procedura[5]. Il controllo del processo si estende così dal livello generale della sequenza alla relazione specifica tra singolo elemento e struttura complessiva del montaggio.

Il Material Digital Twin mantiene inoltre continuità informativa oltre la fase esecutiva. I dati raccolti durante progettazione, fabbricazione e assemblaggio restano associati al componente e possono essere riutilizzati nelle fasi di uso, manutenzione, smontaggio e reimpiego[6] La tracciabilità acquisisce in questo modo una funzione tecnica più ampia, perché collega la presenza fisica del pezzo alla sua storia materiale, prestazionale e operativa lungo l'intero ciclo di vita.Nel quadro della presente ricerca, il Material Digital Twin opera quindi come dispositivo di identificazione, con-

trollo e continuità informativa del componente. La sua efficacia dipende dalla capacità di mantenere allineati elemento fisico, dataset associato e stato del processo, costruendo una relazione stabile tra montaggio, tracciabilità e memoria tecnica del sistema[10].

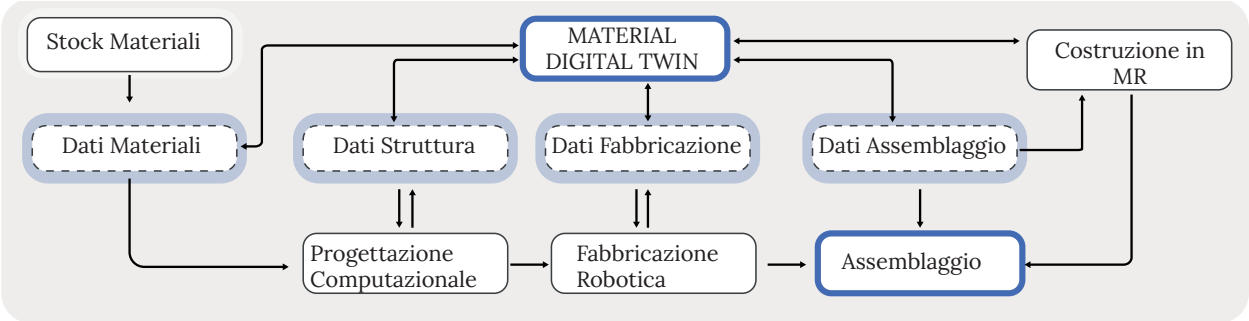


Figura 4.5
Material Digital Twin come infrastruttura di scambio dati tra progettazione, fabbricazione e assemblaggio.
Lo schema rappresenta il MDT come nodo centrale di connessione tra le diverse fasi del processo edilizio digitalizzato, evidenziando il flusso di dati relativo a componente, fabbricazione, montaggio, uso e circolarità.
Fonte: rielaborazione dell'autore su schema del Material Digital Twin presente nei materiali di riferimento. Anja Kunic: reconfigurable wood architecture

1 Kunic, A., Naboni, R., Kramberger, A., & Schlette, C. (2021). Design and assembly automation of the Robotic Reversible Timber Beam. Automation in Construction, 123, 103531.
2 Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufactu ring: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022.
3 Kunic, A., Kramberger, A., & Naboni, R. (2021). Cyber-Physical Robotic Process for Re-Confi gurable Wood Architecture—Closing the circular loop in wood architecture. In Proceedings of the 39th eCAADe Conference: Towards a New, Configurable Architecture. Novi Sad, Serbia.
4 Angeletti, § 2.4.3 Human-Robot Collaborative Assembly with Mixed Reality (MR) and Material Digital Twin (MDT).
5 Hughes, R., Osterlund, T., & Larsen, N. M. (2021). Integrated design-for-manufacturing and AR-aided-assembly workflows for lightweight reciprocal frame timber structures. Construction Robotics, 5, 147–157; Kunic, A., Naboni, R., Kramberger, A., & Schlet te, C. (2021), cit.
6 Malik, A. A., & Brem, A. (2021). Digital Twins for Collaborative Robots: A case study in human-robot interaction. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 68, 102092; Kunic, A., Kramberger, A., & Naboni, R. (2021), cit.

5.3 SISTEMI XR PER IL MONTAGGIO E L'ITERAZIONE OPERATIVA

I sistemi XR introducono nel processo costruttivo una modalità di interazione nella quale dati progettuali, istruzioni di assemblaggio e stati del workflow vengono trasferiti direttamente nello spazio operativo[1]. Nel cantiere aumentato, questa condizione assume un valore tecnico preciso: la sequenza di montaggio, la posizione dei componenti, le connessioni da eseguire e i parametri rilevanti del processo possono essere visualizzati nel luogo stesso dell'azione, senza ricorrere a un continuo passaggio tra documento, schermo e componente fisico[2]. L'interfaccia immersiva agisce così come dispositivo di continuità tra ambiente digitale e ambiente di montaggio.
Nel caso della Mixed Reality, tale continuità viene costruita attraverso la sovrapposizione di contenuti informativi al campo operativo dell'utente. Modello, istruzioni, progressione della sequenza, dati del componente e indicatori di stato vengono resi accessibili come elementi contestuali dell'azione costruttiva[3]. Il montaggio acquisisce in questo modo una struttura più leggibile, poiché l'operatore può orientare il gesto sulla base di riferimenti direttamente associati al componente, alla sua posizione nel sistema e al passaggio esecutivo in corso. La XR assume quindi una funzione di guida operativa e di coordinamento informativo.

Questa funzione emerge con particolare chiarezza nei workflow di assemblaggio collaborativo supportati da MR. Nei materiali che hai inviato, il sistema costruisce un ambiente condiviso nel quale più utenti accedono alla stessa sequenza di montaggio, visualizzano gli stessi dati di costruzione e operano sullo stesso insieme di componenti attraverso un'interfaccia comune[4]. L'interazione non riguarda soltanto la visualizzazione del modello, ma la gestione coordinata

delle operazioni: scelta del blocco, lettura delle istruzioni, verifica della posizione, identificazione dei bulloni, controllo dell'ordine di assemblaggio e aggiornamento del processo in relazione alle azioni eseguite. La MR entra così nella struttura del montaggio come supporto al coordinamento tra attori, componenti e dati.

I sistemi XR estendono inoltre il controllo dell'operatore sul processo. Le interfacce sviluppate nei casi sperimentali mostrano che pannelli olografici, comandi interattivi, dati di avanzamento, assembly sequence e assembly instructions possono essere aggiornati in tempo reale in relazione allo stato del workflow[5]. L'utente riceve quindi una rappresentazione dinamica del processo e, allo stesso tempo, può intervenire su di esso attraverso selezione di passaggi, conferma di operazioni, richiamo di istruzioni precedenti o modifica di alcune condizioni del montaggio. L'interazione operativa si fonda su questa reciprocità tra lettura dello stato e possibilità di azione.

Il rapporto tra XR e montaggio assume ulteriore rilievo nei processi con componenti differenziati e connessioni articolate. La visualizzazione contestuale di fori, bulloni, posizioni e orientamenti riduce il carico interpretativo, migliora la precisione dell'azione e rafforza la comprensione della sequenza esecutiva[6]. In presenza di più operatori o di sistemi robotici collaborativi, la disponibilità di una interfaccia comune consente inoltre di sincronizzare decisioni, tempi e passaggi operativi. La XR agisce quindi come interfaccia di coordinamento tra soggetti diversi e come supporto all'allineamento tra stato digitale e stato fisico del processo.

Nel quadro della presente ricerca, i sistemi XR vengono considerati come parte integrante della costruzione informata. Il sottocapitolo 5.3.1 approfondisce la Mixed Reality come dispositivo di assemblaggio e coordinamento, mettendo in evidenza il rapporto tra istruzioni contestuali, condivisione dell'ambiente di lavoro e sequenza operativa. Il sottocapitolo 5.3.2 analizza la XR come interfaccia uomo–macchina in cantiere, chiarendo come visualizzazione, controllo e interazione possano sostenere workflow collaborativi e ambienti cyber-physical più evoluti[7].

1 Alizadehsalehi, S., Hadavi, A., & Huang, J. C. (2020). From BIM to extended reality in AEC industry. Automation in Construction, 116, 103254; Zolotová, I. et al. (2020), contributi sulle tecnologie XR applicate ai processi costruttivi.

2 Hughes, R., Osterlund, T., & Larsen, N. M. (2021). Integrated design-for-manufacturing and AR-aided-assembly workflows for lightweight reciprocal frame timber structures. Construction Robotics, 5, 147–157.

3 Settimi, A., Gamerro, J., & Weinand, Y. (2022). Augmented-reality-assisted timber drilling with smart retrofitted tools. Automation in Construction, 139, 104272.

4 Atanasova, L., Mitterberger, D., Sandy, T., Gramazio, F., Kohler, M., & Dörfler, K. (2020). Prototype as Artefact: Design Tool for Open-ended Collaborative Assembly Processes. In ACADIA 2020; contributi sperimentali sul sistema ReconWood in ambiente MR.

5 Riferimenti sul custom-designed UI, assembly sequence visualisation e holographic in structions nei workflow di collaborative MR construction.

6 Hughes, R. et al. (2021), cit.; Settimi, A. et al. (2022), cit.

7 Lauren Vasey, Robotic Building as Integration of Design-to-Robotic-Production and -Operation, § 5.4 Digitally Orchestrated Collaboration and Interactivity; § 5.4.1 Human and Robot Collaboration

5.3.1 MIXED REALITY PER ASSEMBLAGGIO E COORDINAMENTO

Nei processi di montaggio collaborativo, la **Mixed Reality** opera come interfaccia di sequenza e di coordinamento. Il suo compito consiste nel rendere disponibili, direttamente nello spazio di lavoro, le informazioni necessarie all'esecuzione del passaggio in corso: identificazione del componente, posizione di posa, ordine delle operazioni, dati delle connessioni e stato di avanzamento[1]. L'attenzione si sposta quindi dalla visualizzazione del modello alla gestione operativa dell'assemblaggio.

Nei workflow sperimentali analizzati, la MR supporta l'assemblaggio attraverso un ambiente condiviso nel quale più utenti accedono alla stessa **assembly sequence** e allo stesso insieme di **assembly instructions**[2]. I blocchi da posare, la loro collocazione nella struttura, la tipologia dei bulloni, la posizione dei fori e l'ordine dei passaggi vengono visualizzati come dati contestuali, aggiornati in relazione allo stato effettivo del montaggio[3]. La procedura acquisisce così una struttura più leggibile, poiché ogni azione viene riferita a un elemento identificato e a una fase precisa della sequenza.

Questa organizzazione informativa produce un effetto diretto sul coordinamento tra utenti. L'ambiente MR consente infatti di condividere una medesima lettura dello stato del processo, riducendo le ambiguità relative a chi deve eseguire una determinata operazione, su quale componente e in quale momento[4]. Il coordinamento non dipende più soltanto da istruzioni verbali o da una lettura separata della documentazione, ma da una interfaccia comune che rende simultaneamente visibili componenti, passaggi e avanzamento della procedura.

La **UI olografica** organizza l'accesso alle informazioni operative. Nei casi considerati, l'interfaccia presenta pannelli dedicati alla sequenza di assemblaggio, alle istruzioni del blocco attivo, ai dati di avanzamento e alle principali informazioni quantitative del sistema[5]. L'utente controlla così il numero del blocco, la fase corrente, i bulloni da inserire, la percentuale di completamento e, nei casi più evoluti, dati relativi a peso, connessioni e quantità complessive del sistema. La UI agisce quindi come interfaccia di conduzione del workflow.

La MR interviene anche nella regolazione della sequenza. I materiali considerati indicano che il sistema può integrare comandi per passare al blocco successivo, tornare a un passaggio precedente, annullare un'operazione o aggiornare la configurazione in relazione alle modifiche introdotte dagli utenti durante il montaggio[6]. La sequenza di assemblaggio viene così trattata come una struttura aggiornabile. Questo aspetto risulta particolarmente rilevante nei processi adattivi, nei quali la costruzione mantiene una coerenza generale e accoglie variazioni locali del layout o dell'ordine operativo. La Mixed Reality svolge anche una funzione di verifica. Quando il componente viene riconosciuto e sincronizzato con il modello, il sistema controlla la coerenza tra pezzo selezionato, posizione prevista e configurazione generale del montaggio□. In presenza di incompatibilità, l'interfaccia segnala la condizione e richiede una correzione della posa o della sequenza. Il coordinamento si fonda quindi su una duplice funzione: supporto all'azione e controllo della sua correttezza.

Nei processi collaborativi, questa condizione risulta particolarmente efficace perché la MR mette in relazione utenti diversi entro uno stesso ambiente informativo. Il sistema distribuisce le istruzioni, aggiorna lo stato del montaggio

e rende visibili le dipendenze reciproche tra le operazioni, costruendo una cooperazione più esplicita e più controllabile[11]. La Mixed Reality agisce così sia come tecnologia di assemblaggio sia come infrastruttura di coordinamento tra soggetti, componenti e sequenza.

Funzioni Operative

Funzione	*Contenuto operativo*
Identificazione del componente	*Riconoscimento del blocco attivo e sua posizione nella sequenza*
Guida al montaggio	*Visualizzazione di fori, bulloni, orientamento, ordine dei passaggi*
Coordinamento tra utenti	*Accesso condiviso allo stato del processo e sincronizzazione delle azioni*
Aggiornamento del workflow	*Avanzamento, ritorno a passaggi precedenti, annullamento o modifica di operazioni*
Verifica	*Controllo di compatibilità tra componente selezionato, posizione e configurazione del sistema*

Tabella 13
Funzioni operative della Mixed Reality nell'assemblaggio
La tabella sintetizza le principali funzioni operative della Mixed Reality nei processi di assemblaggio collaborativo, evidenziando il rapporto tra sequenza, coordinamento e verifica.

5.3.2 XR COME INTERFACCIA DI COMANDO, VERIFICA E FEEDBACK TRA OPERATORE E SISTEMA

Nel cantiere aumentato, la **XR** può essere descritta come interfaccia operativa attraverso la quale l'utente accede ai dati del processo, impartisce comandi, verifica lo stato delle operazioni e riceve feedback contestuali durante l'esecuzione[1]. La sua funzione riguarda quindi la mediazione tra operatore, sistema digitale e ambiente fisico di montaggio. L'interfaccia rende disponibili nello spazio di lavoro informazioni relative al componente attivo, alla fase della sequenza, alle istruzioni correnti e allo stato del workflow, costruendo una relazione diretta tra lettura del processo e azione tecnica.

La dimensione del **comando** si manifesta nella possibilità di interagire con la sequenza operativa attraverso comandi di avanzamento, ritorno a passaggi precedenti, annullamento di operazioni, selezione di componenti o conferma delle fasi completate[2]. L'operatore utilizza l'interfaccia per navigare il processo e per mantenere coerenza tra stato del sistema e ordine delle operazioni. La XR assume così il ruolo di dispositivo di controllo locale del workflow, capace di tradurre la struttura digitale della sequenza in azioni eseguibili in sito.
La dimensione della **verifica** riguarda invece la lettura dello stato del montaggio e la corrispondenza tra componente fisico, istruzione visualizzata e fase effettiva della procedura[3]. L'interfaccia consente di controllare quale elemento sia attivo, quale passaggio sia in corso, quali connessioni debbano essere eseguite e quale sia la posizione corretta del componente nel sistema. Nei processi supportati da identificazione del blocco e sincronizzazione col backend, la verifica si estende anche alla conferma dell'identità del pezzo e alla coerenza tra selezione fisica e dataset associato. La XR opera quindi come interfaccia di riscontro tra operazione prevista e operazione in esecuzione.

La dimensione del **feedback** completa questo assetto. Le informazioni generate dal processo : *stato del componente*, *completamento della fase*, *aggiornamento della sequenza*, *eventuali condizioni di errore o incompatibilità*, vengono restituite all'utente in forma contestuale attraverso pannelli, indicatori o istruzioni aggiornate[4]. Il feedback rende l'interfaccia parte attiva del workflow, perché consente all'operatore di correggere l'azione, confermare un passaggio o modificare la procedura sulla base di dati immediatamente leggibili. La relazione tra comando e verifica viene così chiusa da una risposta del sistema che accompagna il montaggio nel suo sviluppo.

Nel rapporto uomo–macchina, questa struttura produce una distribuzione più chiara delle competenze. Il sistema robotico o il backend di processo mantengono controllo su stato della sequenza, logica delle dipendenze e aggiornamento dei dati; l'operatore utilizza la XR per leggere tali condizioni, confermare passaggi, intervenire su eccezioni e orientare l'azione locale□. L'interfaccia costruisce quindi uno spazio condiviso tra decisione umana e comportamento del sistema, nel quale informazione, comando e risposta vengono mantenuti coerenti.

L'efficacia della XR come interfaccia uomo–macchina dipende dalla qualità con cui questi tre livelli — comando, verifica e feedback — risultano integrati entro il processo costruttivo□. Quando la lettura dello stato, la navigazione della sequenza e l'aggiornamento delle operazioni vengono mantenuti allineati, l'interazione tra operatore e sistema acquisisce maggiore stabilità, il workflow diventa più leggibile e il controllo dell'esecuzione più esplicito. In questa prospettiva, la XR non costituisce un semplice supporto visivo al montaggio, ma una interfaccia tecnica attraverso la quale il processo viene comandato, verificato e regolato in tempo reale.

5.3 SISTEMI XR PER IL MONTAGGIO E L'ITERAZIONE OPERATIVA

Le innovazioni introdotte dalla transizione digitale stanno modificando in profondità il modo in cui il processo edilizio viene concepito, organizzato e verificato nelle sue fasi operative. Secondo la norma UNI 10838, il processo edilizio coincide con la sequenza organizzata di fasi attraverso cui i bisogni vengono identificati e soddisfatti mediante progettazione, produzione, costruzione e gestione del prodotto edilizio[1]. Nel processo edilizio contemporaneo, produzione e costruzione coincidono con il punto in cui il progetto entra in rapporto diretto con i sistemi di fabbricazione, con la logistica, con l'assemblaggio, con il controllo prestazionale e con le condizioni reali dell'esecuzione.
La transizione digitale investe queste fasi con un'intensità specifica, introducendo strumenti di simulazione, ambienti parametrici, procedure automatizzate, interfacce immersive, sistemi cyber-fisici e modelli informativi capaci di accompagnare il componente lungo una catena operativa più continua, più leggibile e più controllabile[2].

La funzione della produzione richiede oggi una rilettura, perché per lungo tempo è stata interpretata come momento successivo alla definizione del progetto, destinato a trasformare in elementi costruibili ciò che era già stato stabilito a monte. Il quadro contemporaneo restituisce invece una condizione più articolata, nella quale la produzione entra nella formazione del progetto come ambiente di verifica, di affinamento e di regolazione, poiché mette in relazione geometria, materiale, macchina, lavorazione, tolleranze, tempi e criteri di assemblaggio[3]. La precisione digitale, la modellazione parametrica, la fabbricazione robotica e la possibilità di integrare dati prestazionali entro il processo operativo hanno ampliato il ruolo della produzione, rendendola un luogo nel quale il progetto viene mi-

surato rispetto alla sua effettiva realizzabilità, alla qualità dei componenti, alla coerenza dei flussi e alla possibilità di gestire variabilità anche elevate entro assetti tecnicamente controllati[4].

La produzione assume il carattere di una fase ad alta densità informativa, nella quale la questione centrale consiste nella capacità di trasformare il modello in istruzioni operative, di collegare la definizione del componente alle logiche di lavorazione, di controllare la sequenza delle operazioni e di predisporre le condizioni che renderanno possibile un montaggio efficiente e accurato. La relazione tra progetto e produzione viene così riformulata attraverso un sistema di corrispondenze continue: la forma del componente dipende dalle modalità di taglio, di assemblaggio e di movimentazione; le scelte relative ai giunti incidono sulla stabilità del montaggio, sulla rapidità esecutiva e sulla futura reversibilità; le decisioni riguardanti il materiale orientano prestazioni, lavorabilità, trasporto, stoccaggio e comportamento in opera[5]. La produzione contemporanea acquisisce quindi il carattere di una infrastruttura di coordinamento nella quale convergono personalizzazione, controllo, ottimizzazione e capacità di adattare il progetto a condizioni operative specifiche senza compromettere la coerenza generale del sistema[6].

La costruzione presenta una condizione analoga, poiché anche in questo caso la transizione digitale modifica il significato della fase, sempre più intesa come ambiente informato e dinamico entro il quale il progetto viene verificato, interpretato e aggiornato nel corso dell'esecuzione. Il cantiere contemporaneo si organizza attraverso una pluralità di dati, dispositivi e procedure che accompagnano il montaggio, la pianificazione, la distribuzione delle risorse, il controllo degli avanzamenti e la correzione delle incongruenze emerse durante le lavorazioni[7]. La costruzione si presenta come uno spazio di coordinamento operativo nel quale convergono pianificazione preliminare,

simulazioni digitali, logistica, sequenze di assemblaggio, supporti alla posa, controllo in tempo reale e raccolta di feedback. L'efficacia della fase dipende dalla possibilità di mantenere una corrispondenza attiva tra ciò che è stato previsto e ciò che si manifesta nel corso dell'esecuzione, così da garantire continuità tra modello, componente, operatore e stato reale dell'opera[8].

Le tecnologie immersive, i sistemi di monitoraggio e i modelli digital twin estendono questa capacità di coordinamento, poiché la visualizzazione aumentata, la mixed reality e le interfacce di supporto all'assemblaggio consentono di trasferire sul luogo della costruzione informazioni contestuali, istruzioni operative e verifiche puntuali, facilitando la comprensione delle sequenze e migliorando la precisione del montaggio[9]. Parallelamente, la sensoristica distribuita, la registrazione dei dati di cantiere e il confronto tra configurazione prevista e configurazione eseguita rendono possibile una forma di controllo più ravvicinata, capace di trasformare il cantiere in un ambiente osservabile e progressivamente apprendente[1□]. La costruzione assume un valore che supera la sola esecuzione materiale: essa diventa il punto in cui l'organizzazione del processo viene confermata, aggiornata e resa verificabile attraverso procedure che collegano azione, informazione e controllo.

Produzione e costruzione vengono così collegate da una continuità informativa che attraversa entrambe le fasi e le riconduce a una stessa logica processuale. Il componente prodotto digitalmente incorpora geometria, regole di montaggio, dati prestazionali, criteri di movimentazione, sequenze di posa e possibilità di verifica. La costruzione recepisce queste informazioni, le applica, le sottopone a controllo e restituisce a sua volta dati utili a comprendere l'andamento effettivo del processo[11]. Si forma in questo modo un circuito nel quale la produzione prepara la costruzione e la costruzione contribuisce a qualificare retroattivamente la produzione, secondo una logica

di scambio continuo tra fasi che in passato apparivano più nettamente separate. Questa continuità risulta particolarmente evidente nei contesti di prefabbricazione avanzata, nella costruzione con elementi speciali, nei processi robotizzati, nei sistemi ad alta personalizzazione e negli scenari di assemblaggio e disassemblaggio orientati alla circolarità dei materiali[12].

Il tema della reversibilità entra pienamente in questa trasformazione. Le pratiche di design for assembly e design for disassembly, insieme ai più recenti orientamenti verso componenti tracciabili, riconfigurabili e riutilizzabili, mostrano che produzione e costruzione non possono più essere lette esclusivamente in funzione dell'opera finita[13]. Partecipano alla definizione di un ciclo più ampio, che comprende manutenzione, sostituzione, smontaggio, recupero e possibile reimpiego dei componenti. La qualità del processo si lega quindi alla capacità di conservare dati, identità e regole operative lungo una durata estesa, così da rendere leggibile il componente anche nelle fasi successive alla sua messa in opera[14]. Una struttura informativa continua acquista, anche per questa ragione, un'importanza ulteriore, perché consente di accompagnare la materia costruita entro possibili scenari futuri di adattamento e trasformazione.

La crescente densità delle relazioni che interessano produzione e costruzione rende progressivamente meno efficace una descrizione del processo edilizio fondata su una semplice sequenza di fasi autonome. Le decisioni relative alla configurazione del componente incidono sulla lavorazione, sulla logistica e sulla posa; le modalità di montaggio influenzano le prestazioni, la manutenzione e la possibilità di disassemblaggio; i riscontri raccolti in costruzione orientano controlli, correzioni e perfezionamenti del flusso operativo[15]. Il processo si organizza così secondo una struttura nella quale interdipendenze, ritorni informativi, soglie di verifica e passaggi di stato diventano ele-

menti essenziali della sua intelligibilità. Da questa condizione deriva la necessità di una rappresentazione per flussi, intesa come forma capace di rendere leggibile un'organizzazione ormai definita da relazioni continue tra dati, componenti, ambienti di fabbricazione, sistemi di assemblaggio e procedure di controllo. Il diagramma di flusso relativo alla produzione e alla costruzione costituisce l'esito sintetico del ragionamento sviluppato in questo capitolo, poiché rende visibile una struttura processuale nella quale la produzione concentra configurazione parametrica, ottimizzazione, fabbricazione, logistica e predisposizione del supporto informativo, mentre la costruzione raccoglie sequenze di montaggio, simulazione, verifica, monitoraggio, feedback operativo e correzione in tempo reale[16].

Il diagramma acquista così un valore metodologico preciso, poiché consente di leggere la continuità tra due ambienti distinti e strettamente comunicanti, entrambi attraversati dalla medesima infrastruttura digitale. La sua funzione consiste nel mostrare che la transizione digitale, nelle fasi della produzione e della costruzione, introduce una forma del processo edilizio più integrata, più adattiva e più consapevole delle relazioni che legano il progetto alla sua concreta realizzazione[17].

---

1 UNI 10838:1999, Edilizia – Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edili zio e alla qualità edilizia.

2 Achim Menges, "The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Con struction," Architectural Design, 85, n. 5, 2015, pp. 28–33; Lauren Vasey, Strategies for Cyber-Physical Robotic Fabrication and Construction in Architecture, University of Stuttgart, Institute for Computational Design and Construction, 2021.

3 Lauren Vasey, Strategies for Cyber-Physical Robotic Fabrication and Construction in Archi tecture, cit.

4 Alicia Nahmad Vazquez, Soroush Garivani, Jean-Nicola Dackiw, "Decentralized, data-infor med, robotic-based digital timber micro-factories," Construction Robotics, 2024; Anja Kunić, Reconfigurable Wood Architecture. A cyber-physical approach for circular design and construction, University of Southern Denmark, 2024.

5 Arash Adel Ahmadian, Computational Design for Cooperative Robotic Assembly of Nonstan dard Timber Frame Buildings, ETH Zürich, 2020; Anja Kunić, Roberto Naboni, Aljaz Kramberger, Christian Schlette, "Design, simulation and robotic assembly of reversible timber structures," Construction Robotics, 5, 2021, pp. 1–10.

6 Alicia Nahmad Vazquez, Soroush Garivani, Jean-Nicola Dackiw, "Decentralized, data-infor med, robotic-based digital timber micro-factories," cit.

7 Lauren Vasey, Strategies for Cyber-Physical Robotic Fabrication and Construction in Architecture, cit.; Xiliu Yang, Felix Amtsberg, Lior Skoury, Hans Jakob Wagner, Achim Menges, "VIZOR: Facilitating cyber-physical workflows in prefabrication through augmented reality," in Post-Carbon. Proceedings of the 27th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2022), vol. 2, 2022, pp. 141–150.

8 Xiliu Yang et al., "VIZOR: Facilitating cyber-physical workflows in prefabrication through augmented reality," cit.; Ondrej Kyjanek, Bahar Al Bahar, Lauren Vasey, Benedikt

Wannemacher, Achim Menges, “Implementation of an Augmented Reality AR Workflow for Hu man Robot Collaboration in Timber Prefabrication,” in Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019), Banff, 2019, pp. 1223–1230.

9 Ondrej Kyjanek et al., “Implementation of an Augmented Reality AR Workflow for Human Robot Collaboration in Timber Prefabrication,” cit.; Xiliu Yang et al., “VIZOR: Facilitating cyber-physical workflows in prefabrication through augmented reality,” cit.

10 Lauren Vasey, Strategies for Cyber-Physical Robotic Fabrication and Construction in Archi tecture, cit.; Xiliu Yang et al., “VIZOR: Facilitating cyber-physical workflows in prefabrication through augmented reality,” cit.

11 Alicia Nahmad Vazquez, Soroush Garivani, Jean-Nicola Dackiw, “Decentralized, data-infor-
med, robotic-based digital timber micro-factories,” cit.; Anja Kunić, Roberto Cognoli, Roberto Na boni, “RE:Thinking Timber Architecture. Enhancing Design and Construction Circularity Through Material Digital Twin,” in M. R. Thomsen, C. Ratti, M. Tamke (a cura di), Design for Rethinking Resources, Springer, 2023, pp. 409–422.

12 Anja Kunić, Aljaz Kramberger, Roberto Naboni, “Cyber-Physical Robotic Process for Re-Con figurable Wood Architecture. Closing the circular loop in wood architecture,” in Proceedings of the 39th eCAADe Conference, Novi Sad, 2021, pp. 181–188; Anja Kunić, Reconfigurable Wood Architecture, cit.

13 Anja Kunić, Roberto Naboni, Aljaz Kramberger, Christian Schlette, “Design, simulation and robotic assembly of reversible timber structures,” cit.; Beril Onalan, Ioanna Mitropoulou, Eleftherios Triantafyllidis, Jens Hunhevicz, Catherine De Wolf, “Computational methods for circular design with non-standard materials: Systematic review and future directions,” International Journal of Architectural Computing, 2025.

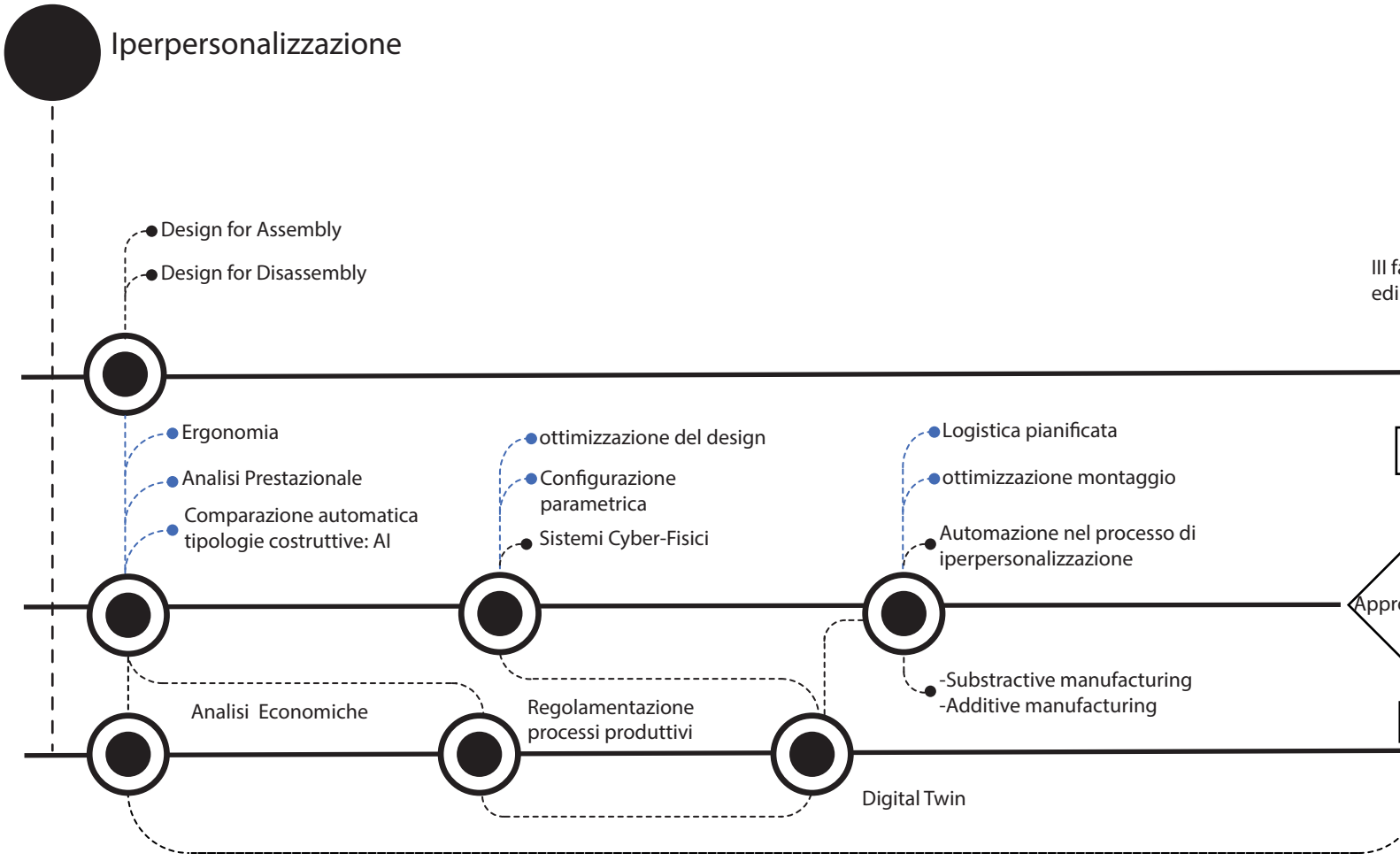
14 Anja Kunić, Roberto Cognoli, Roberto Naboni, “RE:Thinking Timber Architecture,” cit.; Ca therine De Wolf et al., “A 5D Digital Circular Workflow: Digital Transformation Towards Match making of Environmentally Sustainable Building Materials through Reuse from Disassembly,” 2024.

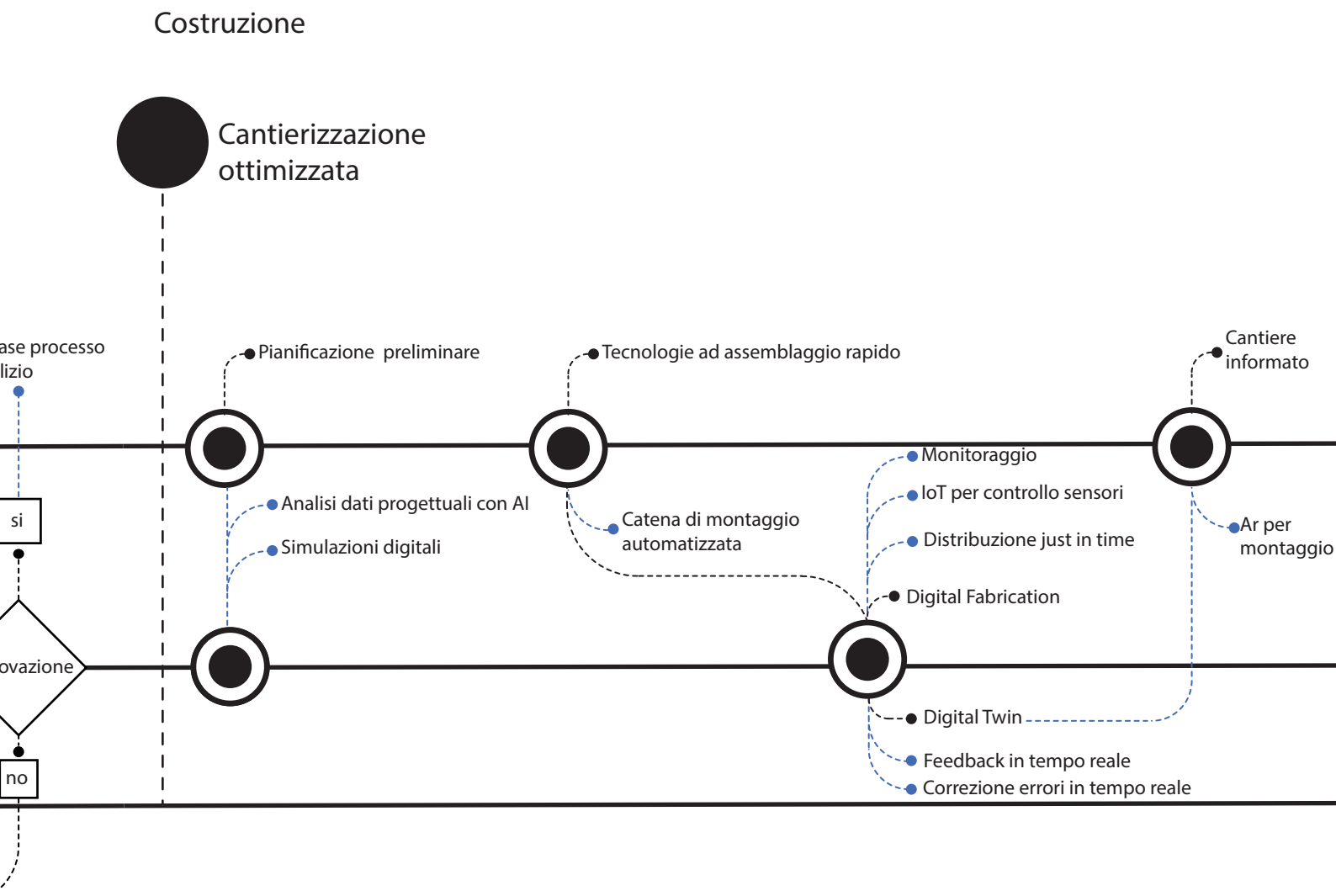
15 Arash Adel Ahmadian, Computational Design for Cooperative Robotic Assembly of Nonstan dard Timber Frame Buildings, cit.; Lauren Vasey, Strategies for Cyber-Physical Robotic Fabrication and Construction in Architecture, cit.

16 Il riferimento è al diagramma di flusso elaborato nell’ambito della presente ricerca, nel quale le relazioni tra produzione, costruzione e continuità informativa vengono rappresentate in forma sintetica.

17 Per l’inquadramento generale del rapporto tra transizione digitale, manifattura avanzata, auto mazione collaborativa e filiere costruttive integrate, si vedano: Achim Menges, “The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction,” cit.; Lauren Vasey, Strategies for Cyber-Physical Robotic Fabrication and Construction in Architecture, cit.; Alicia Nahmad Vazquez, Soroush Garivani, Jean-Nicola Dackiw, “Decentralized, data-informed, robotic-based digital timber micro-factories,” cit.

Produzione


Iperpersonalizzazione
Design for Assembly
Design for Disassembly
III f
edi
Ergonomia
Analisi Prestazionale
Comparazione automatica tipologie costruttive: AI
ottimizzazione del design
Configurazione parametrica
Sistemi Cyber-Fisici
Logistica pianificata
ottimizzazione montaggio
Automazione nel processo di iperpersonalizzazione
Appr
-Substractive manufacturing
-Additive manufacturing
Analisi Economiche
Regolamentazione processi produttivi
Digital Twin


Costruzione
Cantierizzazione ottimizzata
ase processo
lizio
si
ovazione
no
Pianificazione preliminare
Analisi dati progettuali con AI
Simulazioni digitali
Tecnologie ad assemblaggio rapido
Catena di montaggio automatizzata
Monitoraggio
IoT per controllo sensori
Distribuzione just in time
Digital Fabrication
Digital Twin
Feedback in tempo reale
Correzione errori in tempo reale
Cantiere informato
Ar per montaggio

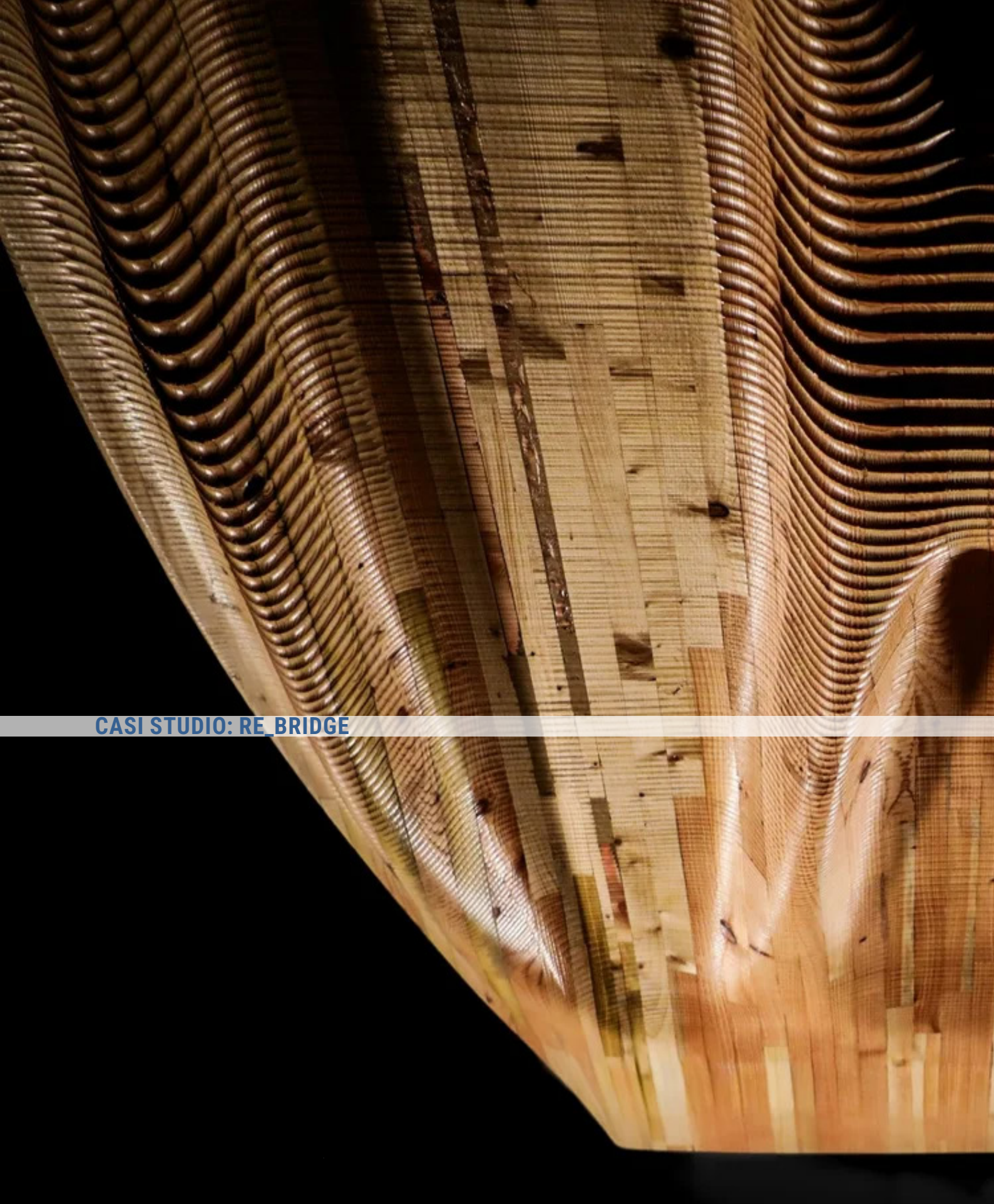


Figura — Caso studio RE-Bridge: prototipo in legno da recupero sviluppato presso la University of Southern Denmark, esito di un processo integrato tra ottimizzazione geometrica, fabbricazione digitale e logiche di assemblaggio.
Fonte: Create Laboratory, University of Southern Denmark.



RE:BRIDGE

A cura di:
Sdu Create, prof. Roberto Naboni
Concept and scientific development: Anja Kunic, Roberto Naboni
Computational design: Anja Kunic, Davide Angeletti, Junaid Nabi, Roberto Naboni
Structural Engineering: Junaid Nabi
Fabrication and construction: Antonio Cristino, Davide Angeletti
Robot planning: Davide Angeletti, Anja Kunic
Material processing and digital stock: Davide Angeletti, Giulia Stefanetti, Anja Kunic, Ardeshir Talaei

Re:Bridge è un ponte sperimentale in legno sviluppato presso SDU CREATE, alla University of Southern Denmark, come caso studio sul riuso strutturale del materiale ligneo e sull'integrazione tra progettazione computazionale, sistemi informativi, costruzione assistita e verifica finale. Il prototipo nasce all'interno di una ricerca che guarda al legno recuperato come materia da riportare entro un processo costruttivo controllato, capace di attribuire nuovo valore a elementi provenienti da flussi di scarto e di ricondurli a una logica strutturale precisa. Il ponte, in questo senso, costituisce un passaggio importante perché traduce una riflessione teorica sulla circolarità del materiale in un manufatto



Figura 5
Legno di scarto non strutturato presso un impianto locale di riciclo (Odense, Danimarca), da cui è stato recuperato lo stock successivamente destinato al riuso strutturale.
Fonte: Laboratorio Create, sdu, Danimarca

reale, costruito, montato e sottoposto a prova.
L'origine del progetto va letta proprio nella natura del materiale da cui prende avvio. Le tavole impiegate in Re:Bridge provengono da stock di recupero e portano con sé una condizione di forte eterogeneità: dimensioni differenti, lunghezze discontinue, densità variabili, segni d'uso, imperfezioni, fori, tagli e irregolarità che appartengono alla loro storia precedente.È proprio questa condizione a definire l'interesse del caso studio, perché il progetto si sviluppa a partire da un materiale che, in molti processi ordinari, verrebbe destinato a usi secondari o considerato difficile da controllare sul piano strutturale. In Re:Bridge, quella stessa eterogeneità viene invece assunta come base di lavoro. Il legno recuperato viene selezionato, pulito, regolarizzato, identificato e misurato, entrando fin dall'inizio in una filiera nella quale la conoscenza del materiale precede la definizione della forma e orienta le decisioni successive.
L'idea che sostiene la ricerca consiste nella costruzione di una procedura capace di mettere in continuità materia, dato e azione tecnica. Re:Bridge verifica la possibilità di trasformare uno stock ligneo disomogeneo in una struttura portante continua attraverso una sequenza integrata di operazioni. La catalogazione iniziale dei pezzi confluisce in un archivio digitale che ne conserva identità e parametri; su questa base si sviluppa la definizione geometrica del ponte, guidata da una relazione tra disponibilità materiale e richiesta strutturale; il processo prosegue poi con la simulazione, con la predisposizione delle istruzioni di montaggio in Mixed Reality, con l'assemblaggio mediante laminazione verticale e chiodatura lignea, con la lavorazione robotica finale e con la prova di carico conclusiva. Il valore del prototipo dipende dalla continuità di questa catena. Ogni fase riceve dati dalla precedente e prepara le condizioni operative della successiva, rendendo leggibile l'intero percorso che conduce dal materiale di scarto all'organismo costruito.

L'oggetto realizzato è un ponte ligneo a campata unica, sviluppato secondo una logica strutturale che unisce variazione geometrica e organizzazione del materiale. Il prototipo ha una lunghezza complessiva di 3,5 m; una volta installato, lavora su una luce effettiva di 2,85 m appoggiata su due blocchi di supporto. La larghezza varia da 1,00 m in corrispondenza degli estremi a 1,75 m nella zona centrale, mentre l'altezza passa da 40 a 180 mm. La struttura viene costruita attraverso una laminazione verticale continua di tavole recuperate, organizzate in modo da formare una sezione collaborante irrigidita da nervature. Questi dati chiariscono con maggiore precisione la natura del caso studio: Re:Bridge si configura come un manufatto portante reale, definito entro limiti dimensionali, costruttivi e prestazionali concreti, e non come un gesto dimostrativo o una semplice applicazione di tecnologie digitali.

All'interno della presente tesi, Re:Bridge concentra in un unico prototipo diversi temi che attraversano l'intera ricerca. Il caso studio permette di osservare come il materiale recuperato possa essere registrato e organizzato entro uno stock digitale; come il dato possa partecipare alla definizione della struttura; come il montaggio possa essere guidato da istruzioni localizzate nello spazio di lavoro; come la costruzione possa essere seguita da una fase di rifinitura robotica; come il comportamento dell'opera possa essere verificato al termine del processo. Il ponte diventa così un riferimento metodologico molto forte, perché mostra una costruzione nella quale il legno di scarto conserva identità, tracciabilità e funzione strutturale lungo tutta la filiera. Proprio per questo Re:Bridge offre un terreno particolarmente efficace per discutere una costruzione digitale fondata sull'incontro tra informazione, materia e controllo operativo.

VIDEO PRESENTAZIONE RE:BRIDGE

Qr Code – Accesso alla visualizzazione video della presentazione del progetto Re-Bridge
Fonte: Laboratorio Create, Sdu, Danimarca, realizzazione: Davide Angeletti



PROGETTAZIONE COMPUTAZIONALE E TOPOLOGY OPTIMIZATION

La definizione geometrica del prototipo è stata sviluppata mediante una procedura di **ottimizzazione topologica** implementata in ambiente Grasshopper tramite Millipede. Il processo è stato impostato definendo un dominio di progetto coerente con i vincoli geometrici del ponte, le condizioni di vincolo e il sistema di carichi applicati. L'ottimizzazione ha restituito un **campo scalare tridimensionale di densità relativa**, successivamente elaborato per derivare tre campi informativi principali: **campo di altezze**, **campo di densità relativa e traiettorie delle tensioni principali.** Questi campi costituiscono la base informativa per la generazione della geometria strutturale.
Il dominio di progetto è stato configurato come una struttura pedonale a campata unica di **3,5 m**. Le regioni di appoggio sono state definite alle due estremità del volume, mentre l'altezza massima del dominio è stata limitata in funzione delle dimensioni delle tavole disponibili nello stock. La larghezza del ponte è stata ampliata in mezzeria. Il modello è stato sottoposto a un carico uniformemente distribuito applicato sulla superficie superiore, con condizioni di vincolo di tipo **cerniera–carrello**. L'ottimizzazione è stata eseguita con una risoluzione spaziale adeguata a garantire la convergenza del campo di densità.

Il campo risultante è stato post-processato integrando le informazioni provenienti dal Material Digital Stock. Il **campo di altezze** è stato riparametrizzato all'interno del range compatibile con lo stock disponibile (40–200 mm), mentre le **traiettorie delle tensioni principali** sono state utilizzate per definire la direzionalità delle nervature e l'organizzazione dell'orditura inferiore. Il **campo di densità relativa** ha consentito di distinguere le zone a maggiore o minore ri-

chiesta strutturale, guidando la distribuzione del materiale. La geometria è stata costruita attraverso una modellazione parametrica articolata in due fasi. In primo luogo, i punti di una **maglia topologica quadrangolare** sono stati traslati lungo l'asse verticale in funzione dei valori del campo di altezze, generando una configurazione tridimensionale di nervature. Successivamente, l'insieme dei punti è stato ricostruito come **mesh quadrangolare** e convertito in una **superficie SubD**, utilizzata come geometria di controllo a bassa risoluzione. Su questa base sono stati definiti i principali parametri geometrici del sistema, tra cui l'altezza delle nervature (Hrib) e lo spessore della sezione, impiegati per generare un insieme di varianti progettuali.

La selezione della configurazione finale è stata condotta mediante una fase di calibrazione basata su analisi agli elementi finiti semplificata. Le varianti sono state confrontate in termini di rigidezza e quantità di materiale impiegato, combinando i due parametri in un indice prestazionale utilizzato per ordinare le soluzioni. La configurazione selezionata è quella che ha mostrato il miglior equilibrio tra prestazioni strutturali e compatibilità con lo stock disponibile. Sulla base di tale selezione, l'intervallo del campo di altezze è stato successivamente raffinato nel range 40–180 mm, utilizzato nelle fasi successive di allocazione del materiale.

CATALOGAZIONE DEGLI ELEMENTI LIGNEI E COSTRUZIONE DEL MATERIAL DIGITAL STOCK

La fase di catalogazione degli elementi lignei è stata impostata in funzione della tecnica di **laminazione verticale** prevista per il prototipo. In questa configurazione, le tavole vengono sovrapposte lungo l'asse verticale e unite mediante adesivo strutturale e chiodatura lignea, che consente di costruire continuità attraverso l'accostamento progressivo degli elementi e la loro integrazione in una struttura portante unitaria, senza ricorrere a sistemi industriali di pressatura estesa. L'adesivo garantisce la continuità tra le superfici di contatto, mentre i chiodi assicurano il serraggio durante la presa e contribuiscono alla stabilizzazione locale del pacchetto laminato. Questa tecnica richiede elementi lineari con spessori ridotti, superfici regolari e geometrie compatibili con la posa stratificata.
Il materiale ligneo recuperato è stato sottoposto a una selezione preliminare basata su criteri geometrici e di integrità. Sono stati privilegiati elementi con spessore inferiore a 50 mm, mentre sono stati esclusi quelli con degrado biologico avanzato, danneggiamenti meccanici estesi o geometrie non compatibili con la configurazione del sistema.

La preparazione del materiale è stata articolata in quattro operazioni standardizzate (Fig. 5.1):

1. **Rilevamento metallico** - individuazione e rimozione di inclusioni metalliche mediante metal detector portatile.
2. **Taglio delle estremità** - eliminazione delle porzioni compromesse.
3. **Rifilatura** - regolarizzazione delle superfici laterali.
4. **Piallatura** - riduzione della variabilità dimensionale delle superfici di contatto.

Al termine della preparazione, a ciascun elemento è stato assegnato un codice identificativo univoco composto dalla classe di spessore e da un numero seriale progressivo, così da ga-

rantirne la tracciabilità nelle fasi successive.

La caratterizzazione quantitativa dei singoli elementi è stata eseguita mediante una procedura automatizzata. Per ogni tavola sono stati registrati **spessore** (T), **altezza** (H), **lunghezza** (L) e **densità** (ρ). Il rilievo è stato effettuato tramite acquisizione fotografica zenitale con riferimento fiduciale e pesatura su bilancia digitale; il codice identificativo e la massa sono stati estratti mediante riconoscimento automatico, mentre le dimensioni lineari sono state ricavate dall'immagine rettificata (Fig. 5.2; 5.3). La densità è stata calcolata come rapporto tra massa e volume. In assenza di informazioni affidabili sulla specie legnosa, la densità è stata adottata come parametro discriminante per la classificazione operativa del materiale. I dati estratti sono stati normalizzati per garantire la coerenza delle unità di misura e la compatibilità con gli strumenti di modellazione parametrica.



Figura 5.1
Sequenza delle operazioni di preparazione del materiale ligneo recuperato: rilievo dei contaminanti metallici, taglio delle estremità compromesse, piallatura delle superfici di contatto e identificazione univoca delle tavole.
Fonte: © SDU CREATE.

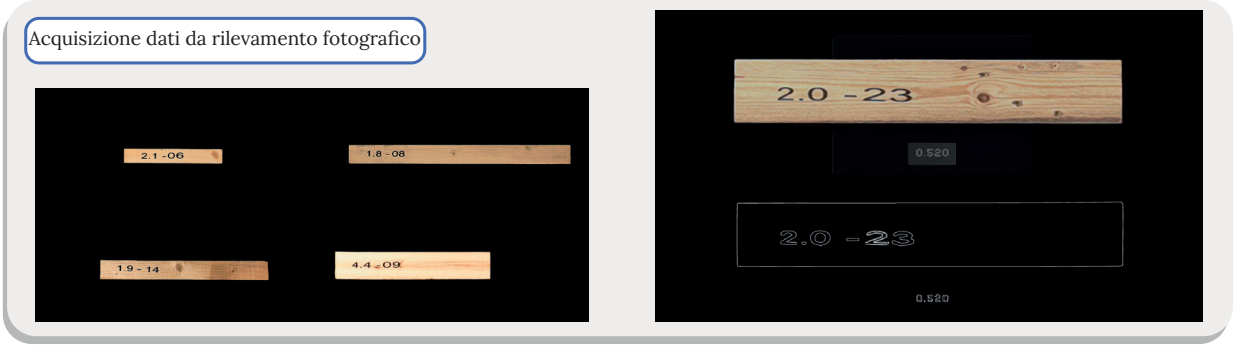


Figura 5.2
Procedura di acquisizione automatizzata dei dati geometrici e identificativi delle tavole mediante rilievo fotografico zenitale, riferimento fiduciale e riconoscimento del codice elemento.
Fonte: © SDU CREATE.

I dati geometrici e fisici estratti dal workflow di acquisizione sono stati organizzati nel **Material Digital Stock (MDS)**, implementato come archivio relazionale per la gestione strutturata delle informazioni associate a ciascuna tavola. Il sistema è stato progettato per garantire la tracciabilità del

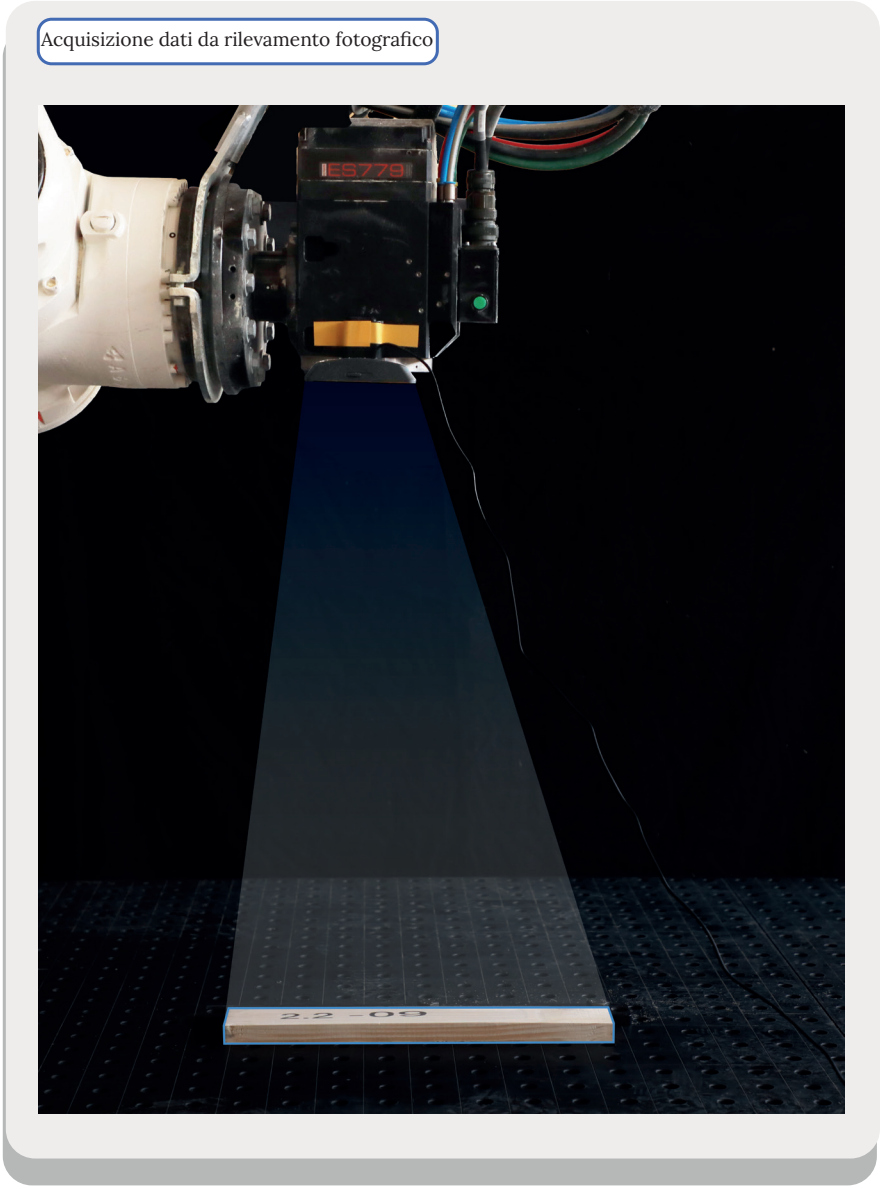


Figura 5.3
Procedura di acquisizione automatizzata dei dati geometrici e identificativi delle tavole mediante rilievo fotografico zenitale, riferimento fiduciale e riconoscimento del codice elemento.
Fonte: © SDU CREATE.

materiale lungo l'intero processo e per consentire la selezione controllata degli elementi nelle fasi di progettazione, simulazione e fabbricazione.

Il MDS è articolato in tabelle contenenti i parametri primari (T, H, L, ρ) e i metadati operativi (classe di spessore, presenza di difetti, esito delle operazioni preliminari). La normalizzazione dei dati ha garantito la coerenza delle unità di misura e la compatibilità con gli strumenti di modellazione parametrica. La densità è stata discretizzata in classi operative definite sulla base della distribuzione statistica dei valori misurati, così da consentire la segmentazione dello stock in insiemi omogenei.

L'integrazione del MDS nel workflow computazionale è stata realizzata mediante un'interfaccia sviluppata in Grasshopper, che permette di **filtrare e selezionare gli elementi** in base ai parametri registrati. Il sistema consente di estrarre insiemi di tavole coerenti con i requisiti geometrici o prestazionali del modello, come la lunghezza disponibile, la classe di densità o combinazioni specifiche dei parametri. In questo modo, ogni elemento fisico può essere associato in modo diretto e controllato alle entità geometriche del modello. (Fig. 5.4)

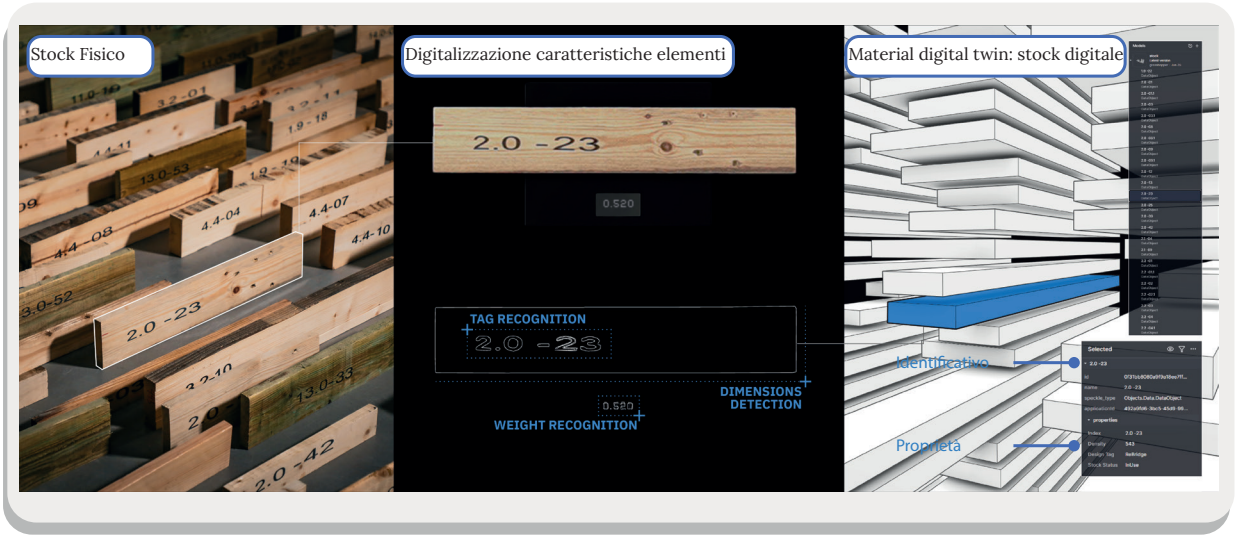


Figura 5.4
Processo di catalogazione e digitalizzazione delle tavole recuperate, dal riconoscimento del materiale fisico alla costruzione del Material Digital Stock (MDS).
Fonte: © SDU CREATE.

L'inventario caratterizzato è stato sottoposto ad analisi statistica per quantificare le distribuzioni di spessore, altezza, lunghezza e densità. (Fig.5.5)

Le analisi hanno definito il dominio operativo per le fasi successive di allocazione del materiale e hanno stabilito i vincoli quantitativi per la generazione della configurazione strutturale. Durante la fabbricazione, il MDS è stato aggiornato in relazione alle tavole impiegate, mantenendo la coerenza tra stock disponibile, materiale allocato e configurazione costruita.

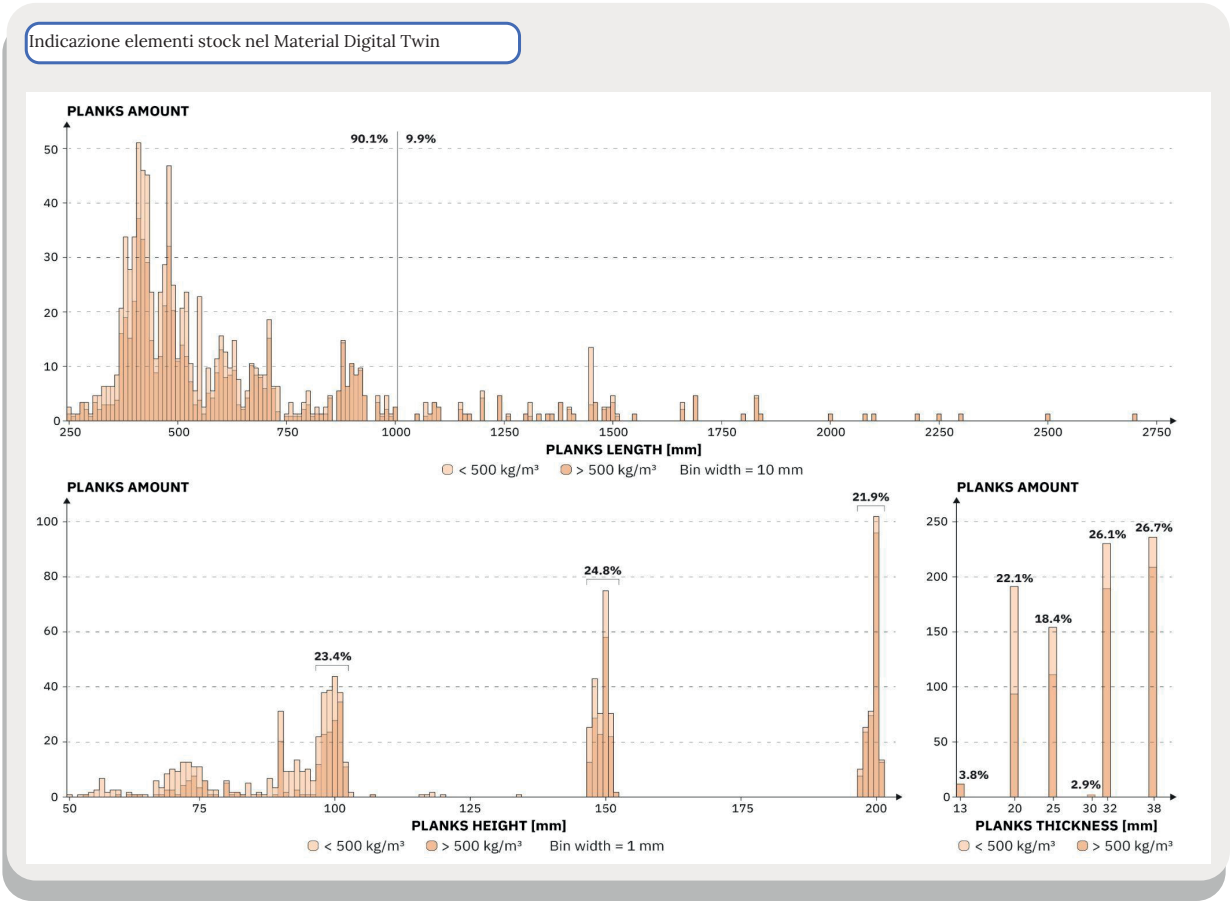


Figura 5.5
Analisi statistica della distribuzione dello stock ligneo recuperato, organizzata per classi di lunghezza, altezza, spessore e densità.
Fonte: © SDU CREATE.

L'integrazione dei dati del Material Digital Stock (MDS) nel modello geometrico è stata strutturata come processo di assegnazione controllata degli elementi lignei alle porzioni della geometria ottimizzata. Ogni tavola è stata associata a una cella del modello in funzione dei parametri registrati nel MDS, con particolare riferimento a lunghezza, altezza e densità. La selezione è stata condotta mediante filtri parametrici che hanno permesso di individuare, per ciascuna porzione della geometria, gli elementi compatibili con i requisiti dimensionali e prestazionali. La procedura ha consentito di avere coerenza tra disponibilità dello stock e configurazione geometrica, riducendo la necessità di adattamenti in fase di fabbricazione.

I parametri assegnati a ciascun elemento sono stati trasferiti al modello di simulazione strutturale, nel quale la densità è stata utilizzata come proxy per la resistenza relativa del materiale. La corrispondenza tra tavole fisiche e proprietà

del modello numerico ha consentito di valutare la risposta strutturale della configurazione generata, verificando la compatibilità tra distribuzione del materiale e domanda strutturale. L'aggiornamento dei parametri nel modello FEM è avvenuto in modo coerente con le assegnazioni effettuate nella fase di allocazione, assicurando la continuità informativa tra MDS, geometria e simulazione.

La configurazione risultante è stata utilizzata per la generazione dei dati necessari alla fabbricazione. Per ciascun elemento è stato esportato l'identificativo univoco, la posizione nella geometria e le informazioni dimensionali richieste per le operazioni di taglio e assemblaggio. Durante la costruzione, il MDS è stato aggiornato in relazione alle tavole impiegate, registrando lo stato di utilizzo e mantenendo la coerenza tra stock iniziale, materiale disponibile e configurazione costruita. Questo aggiornamento ha consentito la tracciabilità del materiale lungo l'intero processo e la corrispondenza tra modello digitale e prototipo fisico.



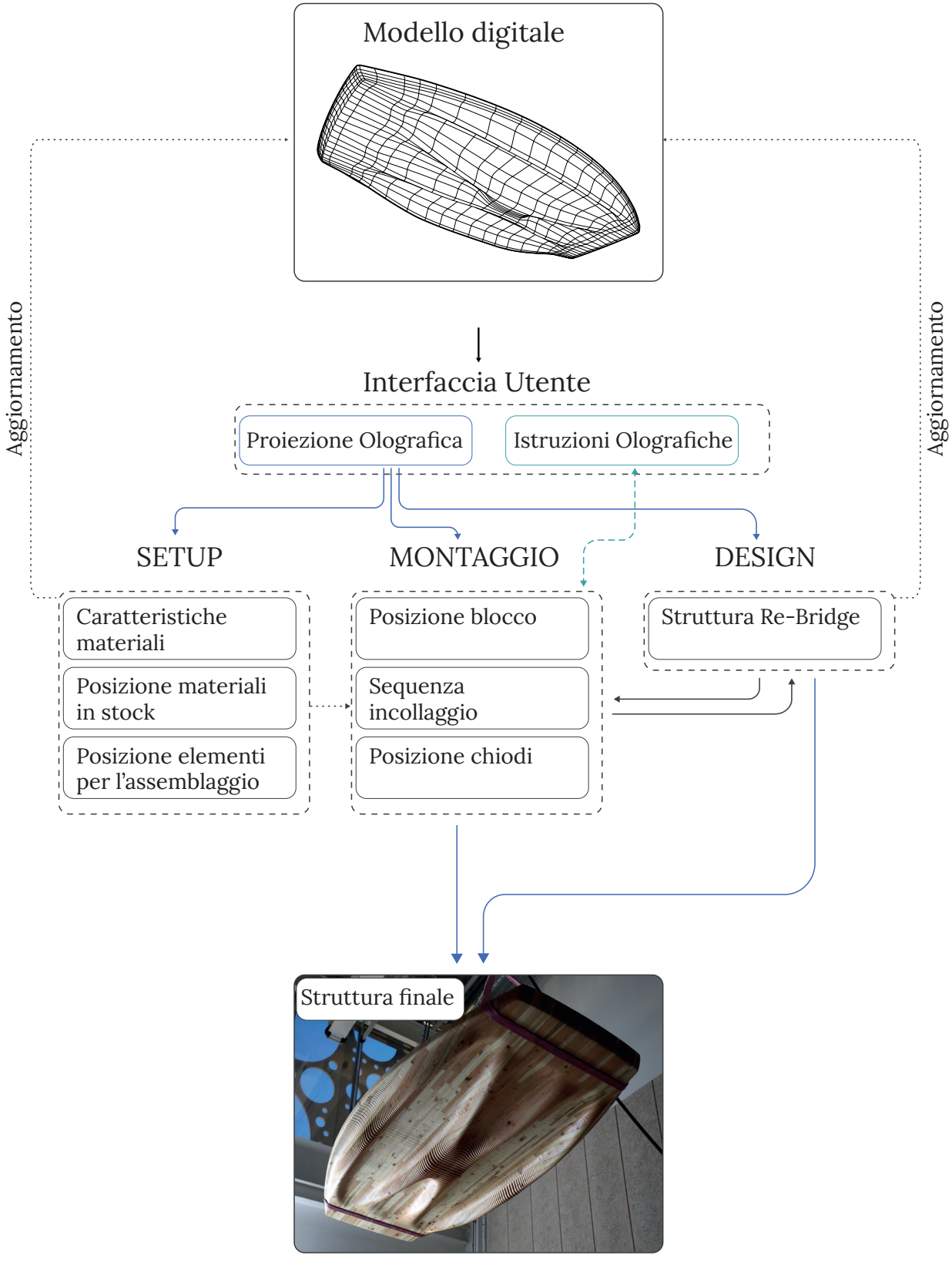
Figura 5.5.1
Catalogazione elementi per Material Digital Stok
Fonte: © SDU CREATE.

CATALOGAZIONE E RILIEVO ELEMENTI LIGNEI:

Qr Code – Accesso alla visualizzazione video della catalogazione degli elementi lignei
Fonte: Laboratorio Create, Sdu, Danimarca



MIXED REALITY E ASSEMBLAGGIO



Il sistema di Mixed Reality impiegato in Re:Bridge è stato sviluppato per trasferire nello spazio di assemblaggio le informazioni necessarie alla laminazione del prototipo. L'ambiente digitale è stato costruito in Grasshopper, utilizzato come piattaforma di coordinamento tra modello geometrico, sequenza di montaggio e dati provenienti dal Material Digital Stock (MDS). La visualizzazione immersiva è stata realizzata tramite **Fologram** (Ref) su dispositivo **Microsoft HoloLens 2**, adottato per sovrapporre al piano di lavoro le istruzioni riferite ai singoli elementi della laminazione. (Fig.5.7)
In questa configurazione, il modello digitale del ponte viene tradotto in una struttura informativa orientata al montaggio nello spazio fisico.



Figura 5.7
Dispositivi utilizzati per il sistema di montaggio in Mixed Reality: visore Microsoft HoloLens 2 e piattaforma Fologram per la visualizzazione immersiva delle istruzioni di assemblaggio.
Fonte: © SDU CREATE.

Nel modello digitale sono stati organizzati i dati necessari alla fabbricazione del ponte. Il sistema integra la geometria del prototipo, la sequenza "**plank-by-plank**" della laminazione, i codici identificativi delle tavole, la loro posizione di posa, le coordinate dei punti di chiodatura, le informazioni relative allo stock e lo stato di avanzamento dell'assemblaggio.
Questi contenuti vengono trasferiti all'interfaccia immersiva come istruzioni localizzate nello spazio di lavoro, rendendo leggibile la relazione tra tavola selezionata, posizione nel layer e operazioni di fis-

saggio. La struttura del sistema è impostata come collegamento continuo tra modello digitale, interfaccia utente, assetto fisico del montaggio e stato informativo del materiale. Il sistema include inoltre una funzione di navigazione della sequenza, che consente di avanzare o arretrare tra i passaggi del montaggio mantenendo aggiornato il punto della procedura.

L'interfaccia sviluppata in Fologram è configurata per visualizzare tre gruppi principali di dati: identificazione dell'elemento tramite codice univoco, posizione di posa della tavola all'interno della sequenza di laminazione e localizzazione dei punti di chiodatura. A queste informazioni si aggiunge la navigazione della sequenza, che consente di avanzare o arretrare tra i passaggi del montaggio mantenendo aggiornato il punto della procedura in corso. La visualizzazione immersiva permette di sovrapporre tali istruzioni direttamente sul piano di lavoro, riducendo l'ambiguità operativa e assicurando la corrispondenza tra modello digitale e configurazione fisica.
Il setup fisico del sistema è organizzato attorno a un'**area di assemblaggio** costituita da tre tavoli di saldatura Siegmund accostati, che formano una superficie di lavoro di 4,5 × 1,5 m. Su questo piano vengono eseguite le operazioni di posa, serraggio temporaneo e chiodatura. In prossimità dell'area di montaggio è predisposta una **stazione di stoccaggio** dei materiali, utilizzata per lo stoccaggio e la movimentazione delle tavole selezionate e dei materiali di consumo necessari alla laminazione. Il sistema comprende inoltre una **postazione** PC, collegata all'ambiente digitale del progetto e utilizzata

per mantenere attiva la comunicazione tra modello, interfaccia immersiva e aggiornamento dei dati di processo.(Fig.5.8)

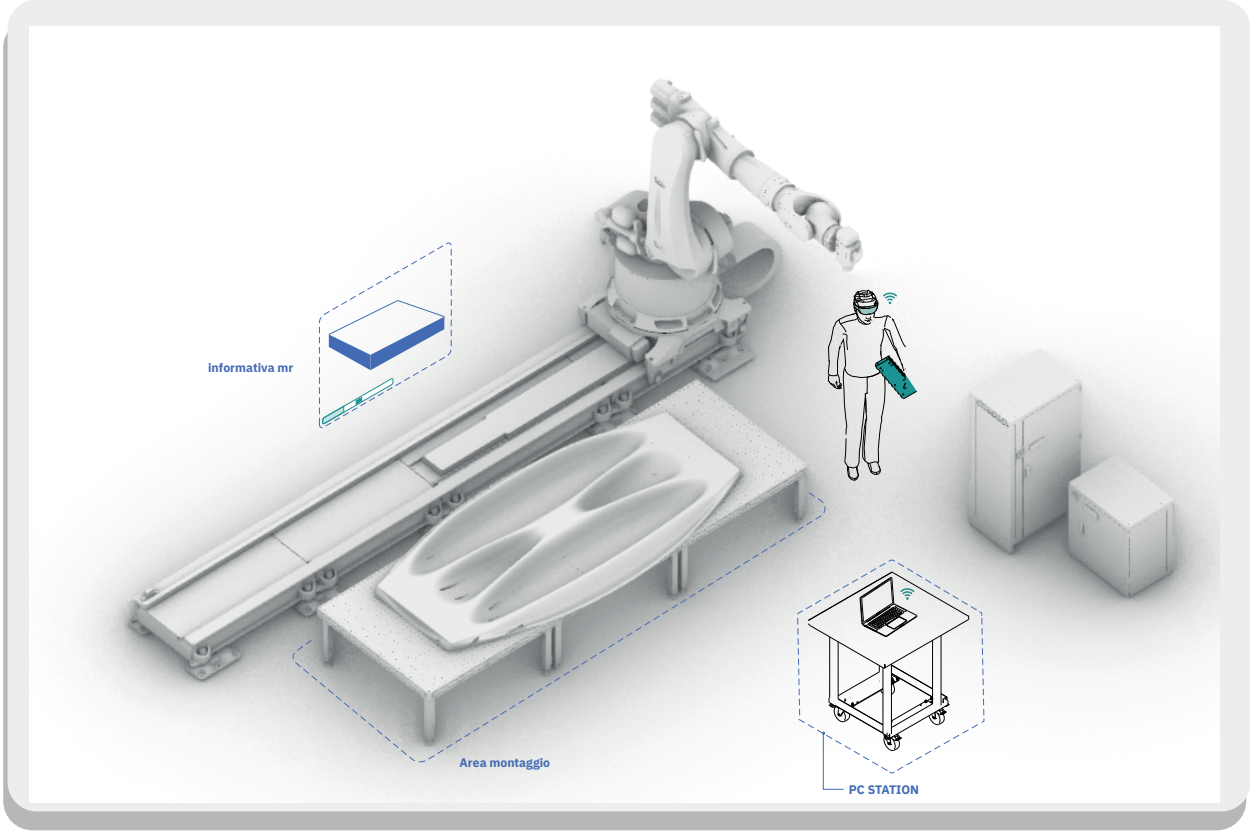


Figura 5.8
Configurazione del setup operativo per il montaggio assistito: area di assemblaggio, postazione PC e dispositivi di supporto al workflow di fabbricazione.
Fonte: © SDU CREATE.

Il piano di lavoro è attrezzato con morse modulari e dispositivi ausiliari di allineamento, impiegati per la stabilizzazione temporanea delle tavole durante l'accostamento e la chiodatura. La configurazione del sistema prevede l'impiego di chiodi lignei LignoLoc F60 4,7 × 58 mm e di un adesivo strutturale monocomponente resistente all'umidità, con tempo aperto nominale di 5 minuti. Questi elementi incidono direttamente sulla sequenza di posa, sui tempi di manipolazione dei pezzi e sull'organizzazione del montaggio, e sono pertanto integrati nel setup operativo.

La fabbricazione è stata eseguita da due operatori inseriti nello stesso ambiente di montaggio assistito. L'interfaccia MR è stata utilizzata come suppor-

to condiviso per la lettura delle istruzioni riferite ai singoli elementi della laminazione, consentendo di distribuire le operazioni di preparazione, posa e fissaggio mantenendo una lettura coordinata del processo e una corrispondenza continua tra modello digitale, stato dello stock e avanzamento dell'assemblaggio.

La procedura di fabbricazione è stata organizzata secondo una logica di **laminazione verticale con adesivo e chiodatura lignea** , sviluppata per assemblare progressivamente tavole recuperate in una sezione strutturale continua. L'adesivo strutturale è stato applicato alle superfici di contatto tra elementi adiacenti e ha costituito il principale meccanismo di trasferimento degli sforzi tra le tavole, mentre i chiodi lignei sono stati inseriti prima della completa presa dell'adesivo per garantire il fissaggio temporaneo e la stabilizzazione progressiva dei layer. La sequenza è stata strutturata come serie di operazioni ripetute: selezione dell'elemento, applicazione dell'adesivo, posizionamento sul piano di lavoro, stabilizzazione mediante clamp e fissaggio tramite chiodatura.

Il sistema di chiodatura è stato definito mediante una procedura iterativa applicata indipendentemente a ciascun layer della laminazione. La disposizione dei fissaggi ha considerato la distanza minima dall'estremità della tavola, la distanza dai bordi, l'interdistanza tra chiodi e la prevenzione delle interferenze tra fissaggi appartenenti a layer adiacenti (Fig. 5.9). Le posizioni sono state inoltre corrette in funzione dell'inclinazione locale della superficie, così da limitare l'esposizione dei chiodi nella successiva fase di lavorazione robotica.

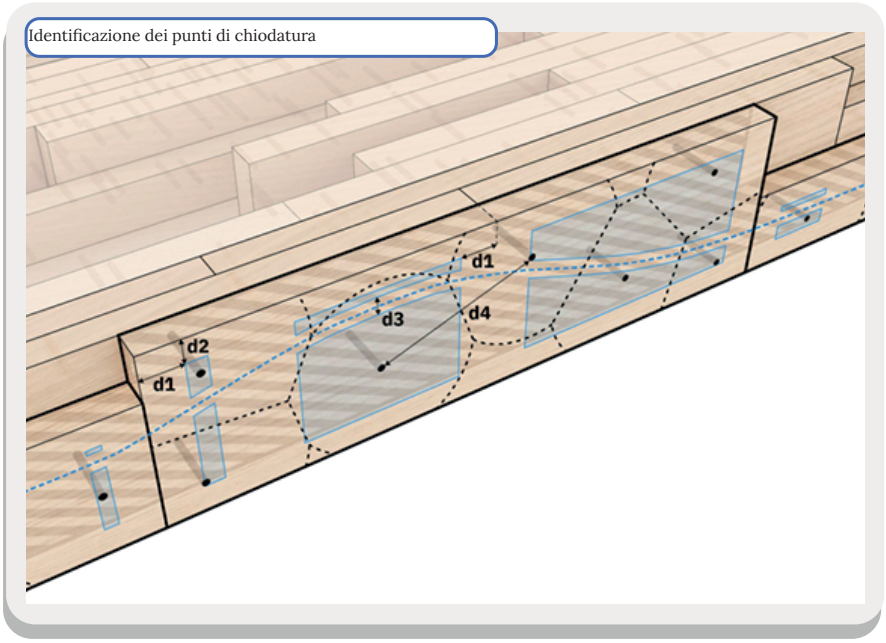


Figura 5.9
Definizione e visualizzazione dei punti di chiodatura nel workflow di laminazione verticale assistita in Mixed Reality.
Fonte: © SDU CREATE.

Durante il montaggio, l'interfaccia MR ha restituito per ciascun elemento le informazioni operative necessarie alla posa: codice identificativo della tavola, posizione di installazione e punti di chiodatura. Questi dati sono stati visualizzati direttamente nello spazio di lavoro e utilizzati per guidare la sequenza di assemblaggio. La lettura condivisa delle istruzioni ha consentito ai due operatori di mantenere la sincronizzazione tra sequenza digitale e avanzamento reale dell'assemblaggio.
La sequenza operativa di montaggio è stato collegato al Material Digital Stock (MDS). Al termine della posa e del fissaggio di ciascuna tavola, il sistema ha registrato lo stato di utilizzo dell'elemento, aggiornando progressivamente la corrispondenza tra stock iniziale, tavole ancora disponibili e configurazione costruita del prototipo. In questo modo, il passaggio dal materiale catalogato al materiale assemblato è stato tracciato in continuità con la sequenza di montaggio, così da mantenere la corrispondenza tra tavola fisica, stato dello stock e configurazione costruita del prototipo (Fig.5.10).

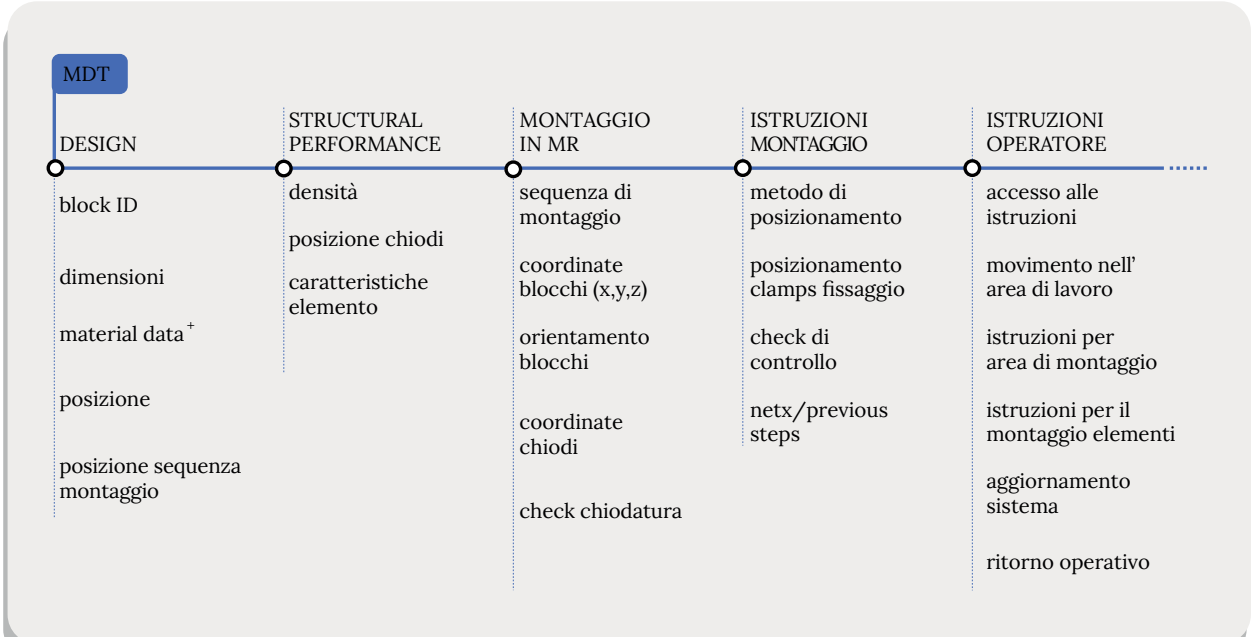


Figura 5.10
Struttura informativa del sistema di montaggio in Mixed Reality, con articolazione dei dati tra Material Digital Stock, modello geometrico, prestazioni strutturali, sequenza di montaggio e istruzioni operative per l'operatore.
Fonte: © SDU CREATE.

La fabbricazione completa del ponte ha impiegato 330 tavole, 1266 chiodi lignei e circa 10 litri di adesivo strutturale, per un totale di 64 layer laminati verticalmente. In condizioni operative regolari, il ciclo di posa di una singola tavola ha richiesto circa 3–5 minuti. I rallentamenti del processo sono stati associati principalmente a svergolamenti accentuati, variazioni locali di spessore e irregolarità dei bordi, che hanno richiesto rilavorazioni o sostituzioni puntuali. Considerando anche queste operazioni, la fabbricazione del prototipo ha richiesto circa 40 ore-uomo.



Figura 5.10.1
Dettaglio della fase di chiodatura
Fonte: © SDU CREATE.



Figura 5.10.2
Dettaglio della fase di laminazione
Fonte: © SDU CREATE.

VISUALIZZAZIONE FASI COSTRUTTIVE IN AMBIENTE DIGITALE DEL MODELLO:

Qr Code – Accesso alla visualizzazione video delle fasi costruttive in ambiente digitale
Fonte: Laboratorio Create, Sdu, Danimarca,

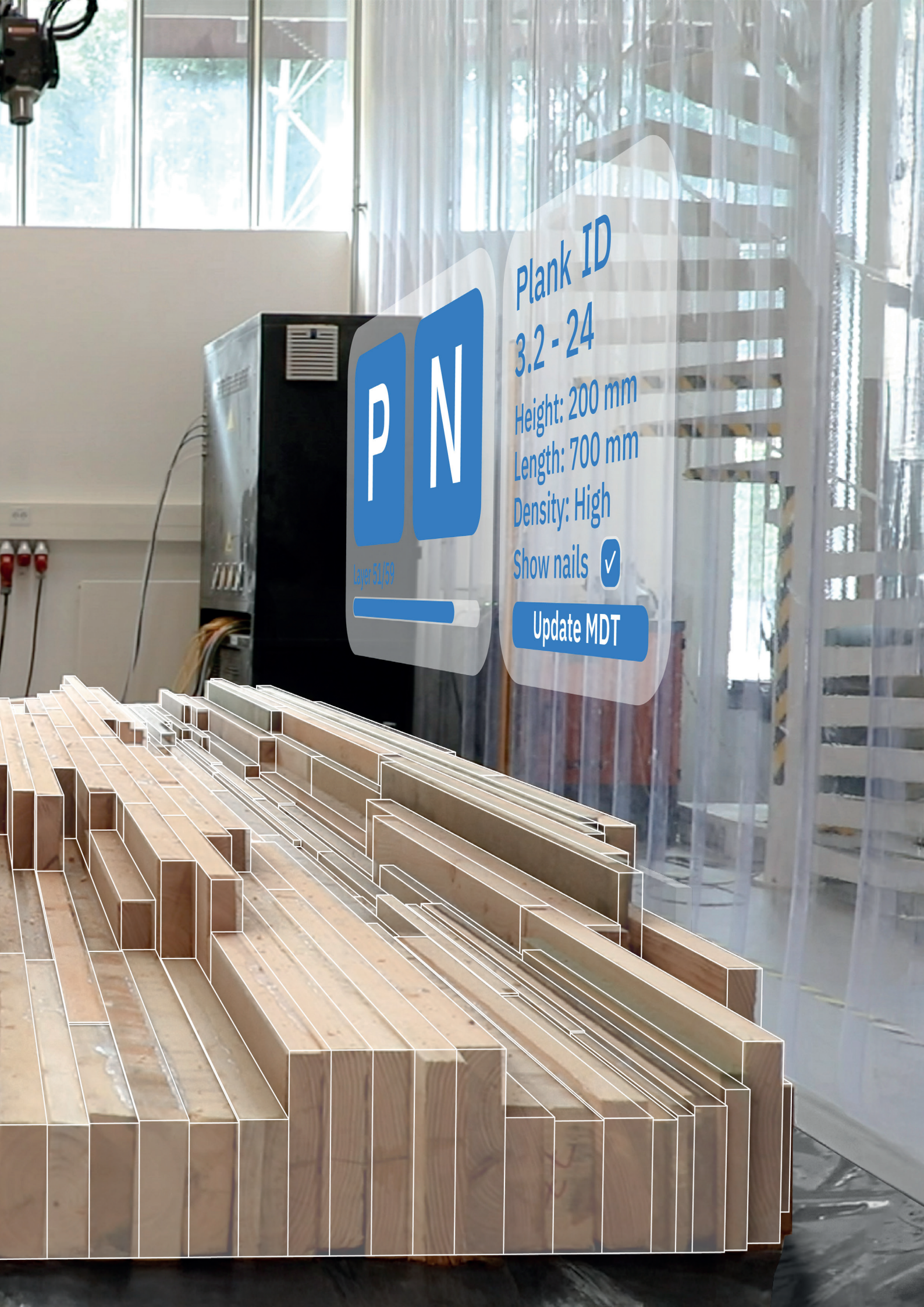


VISUALIZZAZIONE FASI COSTRUTTIVE IN REALTÀ AUMENTATA:

Qr Code – Accesso alla visualizzazione video delle fasi costruttive in realtà aumentata
Fonte: Laboratorio Create, Sdu, Danimarca,




KUKA
3.2 - 24
3.2 - 13
3.2 - 16


P
N
Layer 51/59
Plank ID
3.2 - 24
Height: 200 mm
Length: 700 mm
Density: High
Show nails
Update MDT

MILLING ROBOTICO

La fase di milling robotico è stata eseguita dopo il completamento della laminazione, con l'obiettivo di definire la configurazione geometrica finale del prototipo a partire dalla massa ottenuta nella fase di assemblaggio. La lavorazione è stata condotta mediante un robot industriale KUKA, impiegato per rimuovere il materiale eccedente rispetto alla geometria finale prevista e per rifinire la superficie del ponte in relazione alle condizioni effettivamente assunte dalla struttura dopo la laminazione.

Prima della lavorazione è stata acquisita la geometria reale del prototipo mediante rilievo fotogrammetrico.(Fig.12) L'acquisizione è stata condotta tramite camera calibrata con schema di scatti zenitali e laterali, seguita da ricostruzione in Agisoft Metashape (Ref). La mesh risultante è stata utilizzata per registrare l'as-built della struttura e per riferire il manufatto fisico al sistema di coordinate del robot. Su questa base sono stati definiti i toolpath della lavorazione, cioè i percorsi utensile utilizzati per guidare il processo di fresatura sulla configurazione realmente costruita.

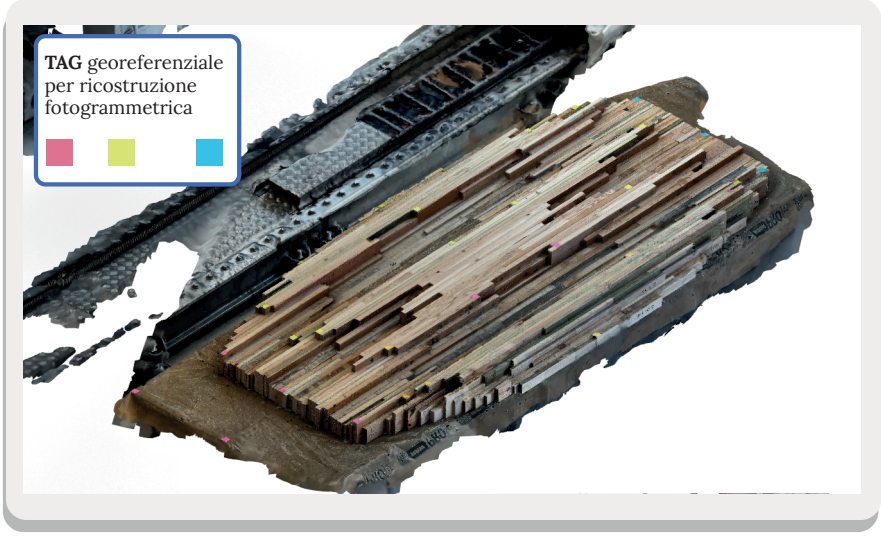


Figura 5.11
Ricostruzione fotogrammetrica.
Fonte: © SDU CREATE.

Il milling è stato articolato in due fasi principali: roughing e finishing. La fase di roughing ha riguardato la sgrossatura iniziale del volume laminato e la rimozione del materiale in ec-

cesso lasciato dalla procedura di assemblaggio. In questa fase la lavorazione è stata impostata secondo una logica di asportazione rapida, finalizzata ad avvicinare progressivamente il prototipo alla configurazione finale. La fase di finishing ha riguardato la rifinitura geometrica e superficiale del ponte, con percorsi utensile più controllati e una maggiore densità locale dei passaggi nelle aree in cui era richiesta una definizione più precisa della superficie.

La lavorazione di finitura è stata impostata con stepover variabile (Fig.13), cioè con una distanza differenziata tra i passaggi utensile in funzione delle condizioni geometriche della superficie. In corrispondenza della mezzeria, dove non era richiesta una superficie smussata e la geometria consentiva una lavorazione meno fitta, è stato utilizzato uno stepover più ampio, pari a circa 40 mm, per accelerare la rimozione del materiale. Nelle aree prossime ai supporti, dove era invece richiesta una maggiore regolarità superficiale e una più elevata precisione geometrica, è stato adottato uno stepover ridotto, pari a circa 1 mm. Questa impostazione ha consentito di differenziare la densità dei passaggi utensile in relazione alle diverse zone del ponte.

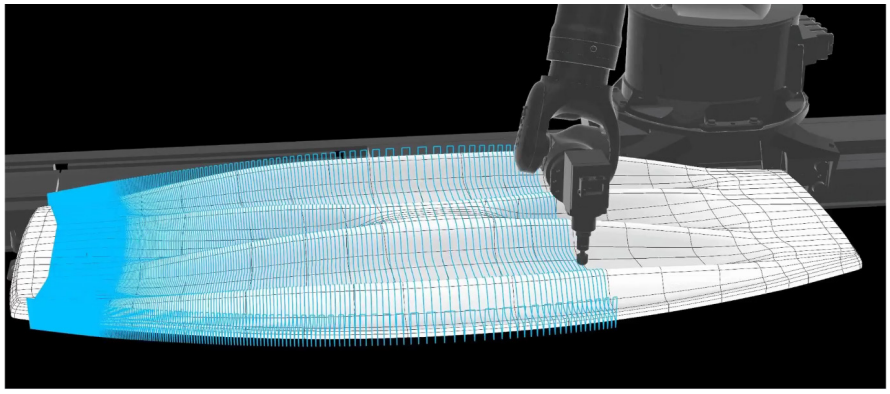


Figura 5.12
Definizione dei toolpath per la lavorazione robotica della superficie del prototipo.
Fonte: © SDU CREATE.

La lavorazione è stata eseguita con utensile a punta sferica da 20 mm, con velocità di avanzamento di 2500 mm/min e profondità di taglio variabile tra 2 e 5 mm, parametri definiti in funzione della curvatura locale e della densità del materiale (Fig.5.13). Al termine della lavorazione, la geometria fresata è

stata confrontata con il modello digitale mediante analisi delle deviazioni dimensionali, verificando la coerenza del profilo finale e la precisione della superficie ottenuta rispetto alla configurazione prevista.



Figura 5.13
Fase di milling robotico della superficie del prototipo durante la lavorazione di finitura.
Fonte: © SDU CREATE.

Nel workflow complessivo del caso studio, il milling robotico si colloca come fase successiva alla laminazione e precedente alla prova di carico. La sequenza operativa comprende acquisizione fotogrammetrica dell'as-built, generazione dei toolpath, sgrossatura iniziale del volume laminato, finitura superficiale differenziata e definizione della configurazione finale del prototipo.



Figura 5.13.1
Fase di milling robotico della superficie del prototipodurante la lavorazione di fresatura
Fonte:© SDU CREATE.

VISUALIZZAZIONE DI PROCESSI ROBOTICI DI FRESATURA::

Qr Code – Accesso alla visualizzazione video delle fasi di fresatura
Fonte: Laboratorio Create, Sdu, Danimarca,



VISUALIZZAZIONE DI PROCESSI ROBOTICI DI FINITURA:

Qr Code – Accesso alla visualizzazione video delle fasi di finitura
Fonte: Laboratorio Create, Sdu, Danimarca



PROVA DI CARICO

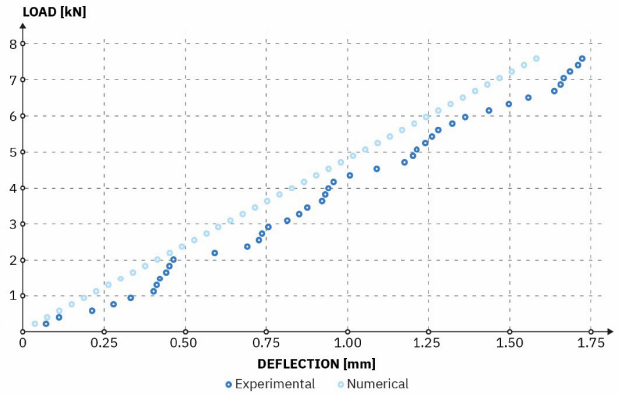
La prova di carico costituisce la fase finale di validazione del prototipo e verifica la corrispondenza tra il comportamento osservato del ponte e la risposta prevista dal modello numerico. Nel caso di Re:Bridge, il test viene impostato come prova statica in campo elastico, con l'obiettivo di controllare la deformazione della struttura sotto carico e di confrontare la risposta misurata con quella restituita dall'analisi agli elementi finiti. La verifica non è orientata alla rottura o alla determinazione della capacità ultima del sistema, perché il ponte è concepito come dimostratore destinato all'uso e la campagna sperimentale si concentra quindi sul comportamento in esercizio.

Il carico viene applicato in modo incrementale su un'area di 1 × 1 m in mezzeria, utilizzando sacchi di sabbia distribuiti progressivamente fino a raggiungere una massa complessiva di 800 kg, corrispondente a un carico applicato di 7,845 kN. Durante il test, la deformazione verticale viene misurata mediante deflettometri collocati in mezzeria, mentre un ulteriore strumento viene posizionato in prossimità dell'appoggio per controllare il comportamento globale della struttura. Questa configurazione consente di leggere con continuità la risposta del ponte durante l'aumento del carico e di ottenere una curva carico–spostamento confrontabile con quella numerica.

La sequenza sperimentale viene riprodotta anche all'interno del modello numerico mediante una procedura quasi-statica, nella quale gli incrementi di carico sono sincronizzati con i passaggi del test reale. Nel montaggio sperimentale, l'azione dei sacchi evolve progressivamente da una condizione inizialmente più localizzata a una distribuzione più uniforme sull'area caricata; nel modello, ogni incremento viene rappresentato come pressione uniformemente distribuita sulla stessa superficie di 1 × 1 m. Questo confronto mantiene quindi un'elevata coerenza tra prova fisica e simulazione, rendendo leggibile il rapporto tra comportamento misurato e risposta prevista.

I risultati mostrano un andamento pressoché lineare delle curve carico–deflessione e una buona corrispondenza tra test e modello. Al carico massimo di 7,845 kN, la deformazione misurata in mezzeria risulta pari a circa 1,73 mm, mentre il modello anisotropo restituisce un valore di circa 1,56 mm nelle stesse condizioni. Lo scarto contenuto tra i due valori rafforza l'affidabilità del sistema sviluppato e conferma la capacità del modello di rappresentare con sufficiente precisione la risposta elastica del prototipo. La prova di carico assume quindi un ruolo che va oltre la semplice chiusura sperimentale del caso studio, perché restituisce una verifica concreta della coerenza raggiunta tra progettazione, fabbricazione e comportamento strutturale.





All'interno della tesi, questo passaggio ha un valore metodologico preciso. Il ponte, ottenuto da tavole recuperate, catalogate, progettate e assemblate entro una filiera digitale, viene riportato sul piano della prestazione e sottoposto a controllo in condizioni reali. La prova di carico chiude così la sequenza operativa di Re:Bridge restituendo al prototipo il carattere di struttura verificata, nella quale il rapporto tra materiale, processo e risposta meccanica può essere osservato e misurato in modo diretto.

VISUALIZZAZIONE DEL TEST DI CARICO:

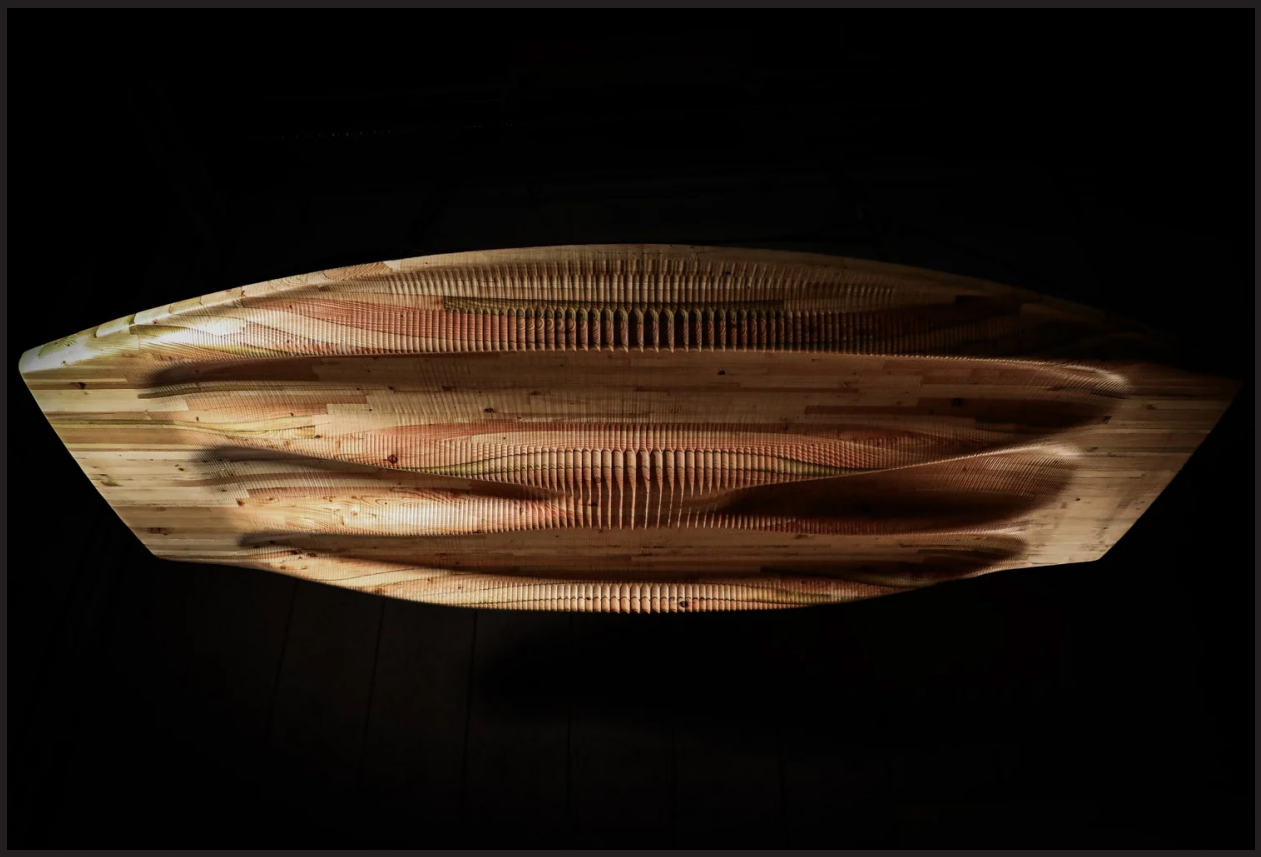
Qr Code – Accesso alla visualizzazione video del test di carico
Fonte: Laboratorio Create, Sdu, Danimarca

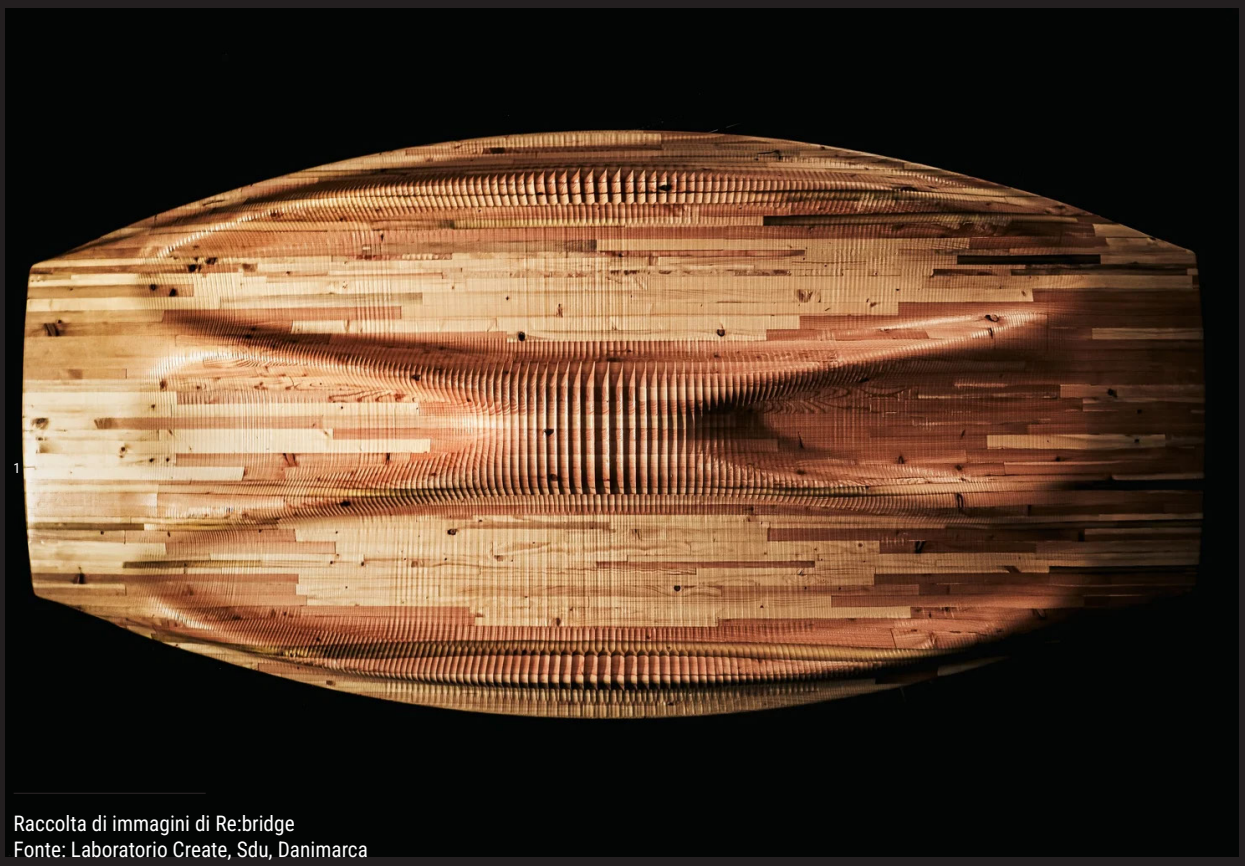


VISUALIZZAZIONE DEL TEST DI CARICO, STRESS DINAMICO, INFLUENZA DA AGENTI ATMOSFERICI:

Qr Code – Accesso alla visualizzazione video del test di carico dinamico
Fonte: Laboratorio Create, Sdu, Danimarca



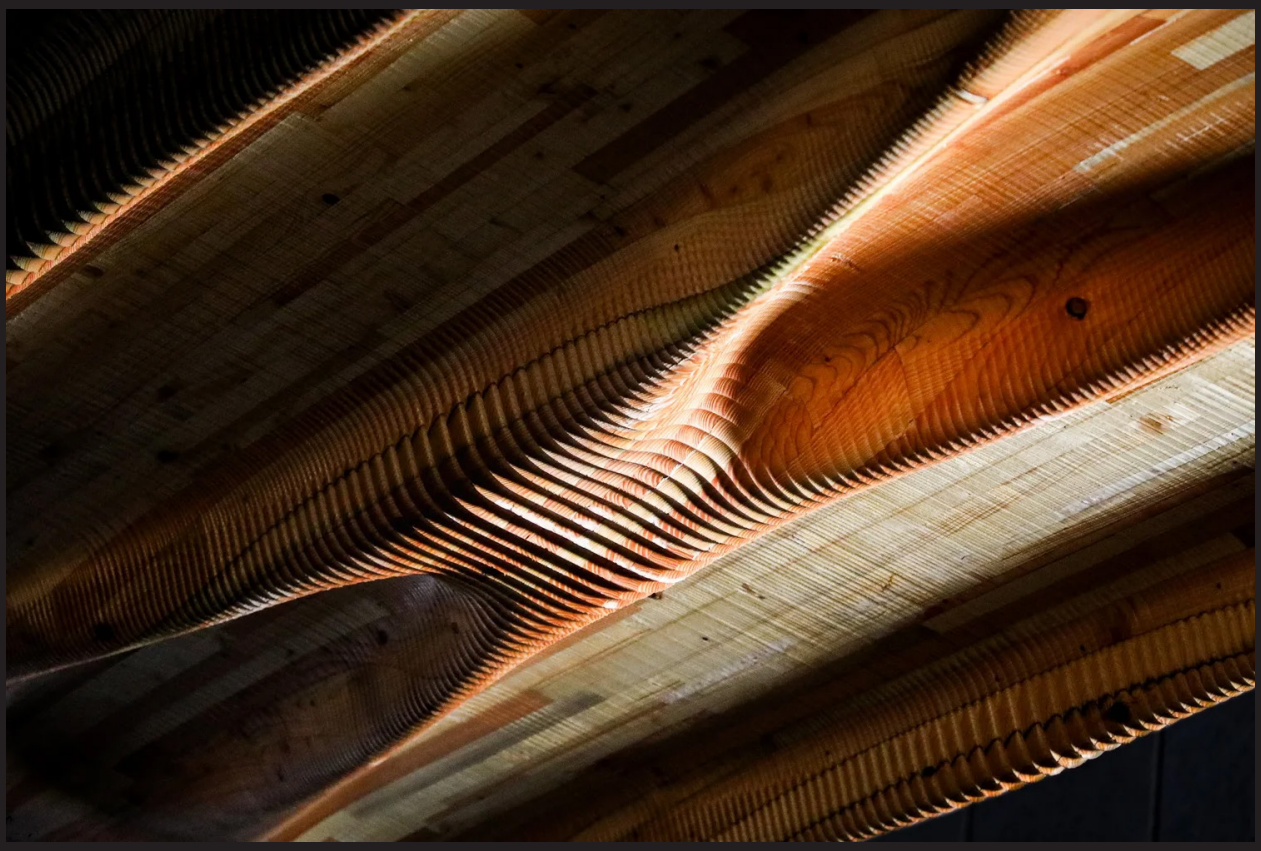




1

Raccolta di immagini di Re:bridge
Fonte: Laboratorio Create, Sdu, Danimarca








CREATE

Raccolta di immagini di Re:bridge
Fonte: Laboratorio Create, Sdu, Danimarca

DISCUSSIONE: ESITI, RILEVANZA E CRITICITÀ DEL CASO STUDIO

L'esperienza di Re:Bridge è assunta come caso studio per osservare, in scala reale, la continuità operativa tra classificazione del materiale, organizzazione dei dati, definizione geometrica, assemblaggio assistito e verifica finale. Il prototipo consente di analizzare una filiera nella quale un materiale eterogeneo viene progressivamente ricondotto entro un sistema informativo e costruttivo controllato, attraverso procedure di acquisizione, elaborazione, trasferimento e aggiornamento dei dati.

Dal punto di vista degli esiti, Re:Bridge mostra che il riuso strutturale del legno recuperato diventa operativamente gestibile quando la variabilità del materiale è affrontata attraverso tre condizioni integrate: una caratterizzazione iniziale accurata dello stock, una struttura informativa capace di mantenere la corrispondenza tra elemento fisico e dato associato e una sequenza costruttiva assistita in grado di supportare posa e controllo dei componenti durante il montaggio. In questa configurazione, il Material Digital Stock, la progettazione informata dallo stock, il montaggio in Mixed Reality e la lavorazione robotica operano come parti dello stesso workflow.
Il caso studio assume rilievo perché consente di analizzare una delle questioni centrali della ricerca: la costruzione della continuità informativa tra progetto, fabbricazione e controllo. Re:Bridge rende osservabile questa continuità in una condizione caratterizzata da tolleranze variabili del materiale e dalla necessità di decisioni adattive lungo l'intera filiera. Il caso studio mostra inoltre che la continuità informativa dipende dalla capacità del sistema di aggiornare e riallineare i dati in funzione delle condizioni materiali rilevate durante il processo. Su questo piano, rilievo, database, modellazione parametrica, interfacce immersive e lavorazione robotica risultano integrati all'interno di un'unica infrastruttura operativa.

L'esperienza evidenzia anche alcune criticità.
Il processo richiede una fase iniziale di acquisizione e organizzazione dei dati particolarmente accurata, una corrispondenza stabile tra modello digitale e configurazione fisica e una gestione continua delle tolleranze durante il montaggio. Le irregolarità geometriche del materiale recuperato, gli svergolamenti, le variazioni locali di spessore e la necessità di rilavorazioni puntuali indicano che la continuità digitale del workflow si sviluppa entro condizioni materiali caratterizzate da elevata variabilità. Anche il sistema di montaggio assistito richiede infrastrutture tecniche dedicate e competenze specialistiche, condizione che ne delimita l'applicazione ai contesti nei quali tali risorse risultano effettivamente disponibili.
Re:Bridge opera quindi come dimostratore sperimentale del rapporto tra materiale, informazione e azione costruttiva nella transizione digitale del processo edilizio. Il caso studio rende osservabile una filiera nella quale la tracciabilità del dato accompagna il materiale dalla catalogazione iniziale alla configurazione costruita e alla verifica finale, offrendo un riferimento metodologico per analizzare il ruolo degli strumenti digitali nella continuità del processo edilizio.



Re:bridge, test di carico. In foto da sx a dx: Antonio Cristino, Davide Angeletti.
Fonte: Laboratorio Create, Sdu, Danimarca


CREATE



Figura — Caso studio C_02: nella foto, ricostruzione di un fregio arhitettonico di un palazzo storico, tramite ricostruzione digitale e lavorazione robotica.
Fonte: Viaggio nel Futuro Architetti



CASI STUDIO: C_02

C02

Integrazione tra progettazione informata, visualizzazione immersiva e costruzione digitale in un edificio storico

Ristrutturazione e riqualificazione di una palazzina storica mediante analisi delle esigenze, simulazione immersiva, isolamento in canapa e ricostruzione digitale degli apparati decorativi.

TIPOLOGIA	Ristrutturazione e riqualificazione di edificio storico
LUOGO	Cerignola
ANNO	2025
UTENTI	Coppia committente
AMBITI DI APPLICAZIONE	Progettazione degli interni, isolamento in canapa, cantierizzazione, ricostruzione digitale dei fregi









Il caso **C02** riguarda la ristrutturazione e la riqualificazione di una palazzina storica caratterizzata da un impianto distributivo rigido, geometrie non regolari e apparati decorativi parzialmente degradati o mancanti. Il progetto ha esteso il processo digitale dalla definizione delle soluzioni spaziali alla verifica dei componenti costruttivi e alla produzione degli elementi decorativi da reintegrare in facciata.

I moduli rivolti alla committenza e la visualizzazione immersiva sono stati utilizzati per interpretare le esigenze abitative, valutare le relazioni tra gli ambienti e verificare le soluzioni compatibili con la struttura esistente. Lo stesso ambiente digitale ha supportato lo studio dell'isolamento in canapa, delle modalità di posa e delle sequenze di cantierizzazione.

RUOLO DEI MODULI E DELLA VISUALIZZAZIONE IMMERSIVA

MODULI UTENTI

I moduli hanno consentito di ricostruire le priorità abitative della coppia e di tradurle in requisiti verificabili, con particolare riferimento a privacy, relazioni tra gli ambienti, comfort termoacustico, fruibilità e conservazione della preesistenza.

VISUALIZZAZIONE IMMERSIVA

La simulazione immersiva ha permesso di valutare proporzioni, percorsi, visuali interne, percezione della luce naturale e compatibilità tra le funzioni richieste e la rigidità distributiva dell'edificio.

SKILLS PROGETTUALI RICOSTRUTTIVE RETROSPETTIVAMENTE*

- tutela della privacy
- continuità funzionale
- leggibilità dei percorsi
- adattabilità degli spazi
- integrazione impiantistica
- comfort termoacustico
- conservazione della preesistenza
- reversibilità degli interventi
- semplicità di montaggio
- riduzione delle interferenze in cantiere

** Priorità ricostruttive retrospettivamente sulla base della documentazione conservata e dell'analisi del processo progettuale.*

VERIFICA DEL SISTEMA DI ISOLAMENTO IN CANAPA

La modellazione tridimensionale è stata impiegata per verificare l'inserimento del sistema isolante rispetto alle geometrie esistenti, agli spessori disponibili e ai punti di interferenza con aperture, elementi strutturali e reti impiantistiche. La simulazione ha inoltre supportato la definizione delle modalità di posa e delle sequenze operative.

Le verifiche hanno riguardato:

- compatibilità geometrica e prestazionale con la muratura storica;
- gestione dell'umidità e igro-regolazione del pacchetto;
- continuità dell'isolamento in corrispondenza di nodi critici;
- definizione di dettagli costruttivi per ponti termici e giunzioni;
- valutazione della filiera dei materiali e dei criteri di posa.

SIMULAZIONE DELLE FASI DI MONTAGGIO E CANTIERIZZAZIONE

La rappresentazione digitale delle fasi costruttive ha consentito di anticipare le principali interferenze operative, definire l'ordine di montaggio e coordinare l'inserimento dei nuovi componenti con la conservazione degli elementi esistenti.

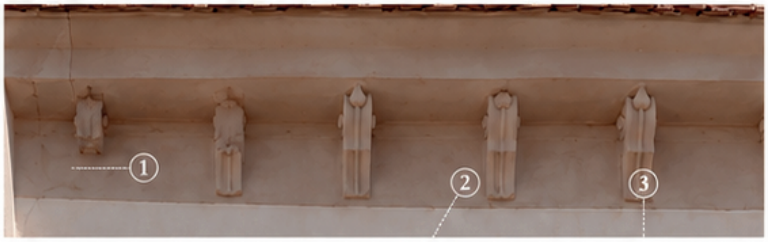


INSIGHT PROGETTUALE

La rigidità distributiva e costruttiva dell'edificio storico ha richiesto un processo di verifica integrato, capace di mettere in relazione esigenze della committenza, configurazione spaziale, prestazioni dell'involucro e modalità esecutive. I modolii e la visuallizzazione immersiva hanno supportato la definizione delle scelte interne e la verifica anticipata dei sistemi di isolamento e delle sequenze di montaggio.
Il caso mostra quindi l'estensione del modello digitale dalla fase decisionale alla preparazione della costruzione.

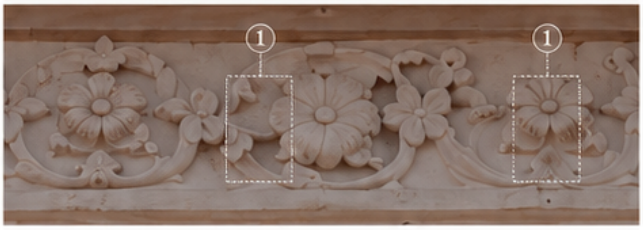
Il rilievo diretto e fotografico ha evidenziato un apparato decorativo incompleto e disomogeneo, caratterizzato da lacune, perdita di modellato, discontinuità geometriche e alterazioni localizzate nei punti di attacco alla muratura. L'analisi ha distinto gli elementi superstiti ancora leggibili dalle porzioni mancanti o degradate, definendo il quadro conoscitivo necessario alla successiva acquisizione digitale e alla ricostruzione dei componenti sostitutivi.

MENSOLE SOTTO CORNICE



1. Mancanza di porzioni di mensola.
2. Degrado e perdita di continuità formale.
3. Irregolarità geometriche e discontinuità di posa.

FREGIO DECORATIVO



1. Lacune puntuali del fregio floreale con interruzione del motivo.



2. Erosione e perdita di definizione del rilievo.
3. Assenza di porzioni di cornicamento e raccordi.

MENSOLE CON FREGIO





1. Lacune puntuali



2. Perdita di modellato e spigoli smussati per erosione superficiale.

ELEMENTI IN DEPOSITO



Decorazioni rimosse, restaurate e completate delle parti mancanti

QUADRO DELLE CRITICITÀ

- Lacune puntuali e diffuse del fregio decorativo.
- Assenza totale o parziale di mensole e porzioni di coronamento.
- Perdita di definizione del rilievo, erosione superficiale e smussamento degli spigoli.
- Discontinuità geometriche e differenze dimensionali tra elementi nominalmente analoghi.
- Interfacce irregolari con il supporto murario, rappezzi e integrazioni non coerenti.

IMPLICAZIONI PER LA RICOSTRUZIONE DIGITALE

1. Schedatura per componente e per stato di conservazione.
2. Acquisizione tridimensionale dei lacerti superstiti.
3. Verifica delle ricorrenze geometriche e delle proporzioni compositive.
4. Definizione di modelli sostitutivi compatibili per forma, scala e modalità di posa.

ESITO DELL'ANALISI

Il sistema decorativo di facciata presenta un'elevata eterogeneità di conservazione. La ricostruzione non può essere fondata sulla semplice replica di un singolo elemento, ma richiede la correlazione tra rilievo fotografico, lettura comparativa dei lacerti superstiti e formalizzazione digitale delle regole compositive.

C02 Dal rilievo alla ricostruzione dei fregi decorativi

Sequenza di acquisizione, ricostruzione geometrica, integrazione delle lacune e fabbricazione digitale degli elementi destinati alla reintegrazione in facciata.

WORKFLOW OPERATIVO

ACQUISIZIONE E INTERPRETAZIONE

1. **SMONTAGGIO E CATALOGAZIONE**
   Smontaggio controllato degli elementi superstiti e catalogazione geometrica e materica.
2. **ACQUISIZIONE E RICOSTRUZIONE DIGITALE**
   Rilievo tridimensionale degli elementi e ricostruzione delle geometrie esistenti tramite modellazione digitale.

MODELLAZIONE E PRODUZIONE

3. **INTEGRAZIONE DELLE PARTI MANCANTI**
   Analisi delle lacune e ricostruzione coerente delle parti mancanti sulla base di proporzioni e moduli ricorrenti.
4. **SCOMPOSIZIONE ESECUTIVA**
   Scomposizione del modello in componenti producibili, definizione di interfacce, giunzioni e tolleranze.

ASSEMBLAGGIO E COSTRUZIONE

5. **FRESATURA CNC**
   Fresatura e sagomatura materica dei componenti in materiale lapideo/composito secondo i modelli esecutivi.
6. **ASSEMBLAGGIO E POSA IN OPERA**
   Prova, assemblaggio a secco, verifica di accoppiamento e posa degli elementi in facciata.

RICOSTRUZIONE DIGITALE E INTEGRAZIONE DELLE LACUNE

FREGIO FLORALE (lineare)

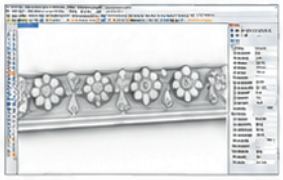
Elemento decorativo a sviluppo orizzontale con motivo floreale a rilievo.

ELEMENTO SUPERSTITE
Condizione rilevata



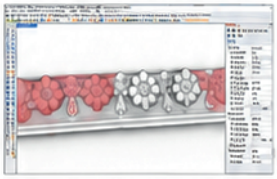
Porzioni di fregio ancora presenti in facciata con evidenti lacune.

MODELLO DIGITALE RILEVATO
Ricostruzione geometrica delle parti esistenti



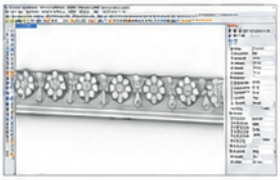
Modello 3D ottenuto da rilievo, comprendente solo le porzioni effettivamente conservate.

INDIVIDUAZIONE DELLE LACUNE
Analisi delle mancanze



Le lacune vengono evidenziate e classificate in base alla loro estensione e posizione.

MODELLO COMPLETO INTEGRATO
Ricostruzione e completamento digitale



Modello completo del fregio con integrazione coerente del motivo floreale e delle proporzioni.

MENSOLA SOTTO CORNICE

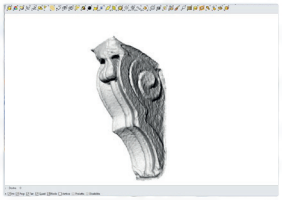
Elemento con funzione di sostegno e valore decorativo.

ELEMENTO SUPERSTITE
Condizione rilevata



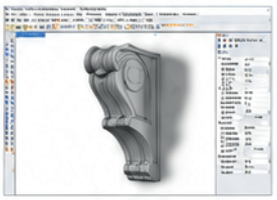
Mensola degradata e parzialmente mancante nelle sue parti terminali.

ACQUISIZIONE 3D
Ø rilievo fotografico



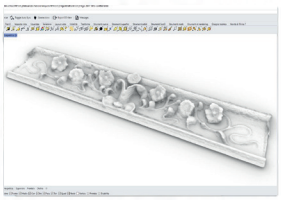
Acquisizione 3D tramite scanner e rilievo fotografico integrativo.

RICOSTRUAZIONE GEOMETRICA
Integrazione delle parti mancanti



Ricostruzione delle porzioni mancanti secondo simmetrie e moduli ricorrenti.

MODELLO ESECUTIVO
Pronto per la produzione



Modello ottimizzato per la produzione con dettagli di attacco e interfacce.

DALLA PRODUZIONE ALLA POSA IN OPERA

ACQUISIZIONE IN CANTIERE
Rilievo in situ



Rilievo fotografico e metrico dei fregi in opera con analisi delle condizioni di degrado.

SCOMPOSIZIONE E LAVORAZIONE CNC
Produzione dei componenti



Realizzazione dei componenti tramite fresatura CNC secondo il modello esecutivo.

ASSEMBLAGGIO A SECCO
Verifica di accoppiamento



Assemblaggio a secco in officina per la verifica delle geometrie, tolleranze e connessioni.

INTEGRAZIONE DEI COMPONENTI
Completamento del sistema



Integrazione delle parti mancanti e finitura delle superfici secondo le caratteristiche materiche.

MONTAGGIO IN CANTIERE
Posa in opera



Posa degli elementi in facciata con fissaggi meccanici e controllo della finitura superficiale.

OBIETTIVO DEL PROCESSO

Il rilievo non produce soltanto una rappresentazione digitale dell'esistente, ma una struttura geometrica interrogabile e modificabile, capace di guidare la ricostruzione delle lacune, la scomposizione dei componenti e la loro produzione. Questo approccio garantisce coerenza formale, controllo dimensionale e qualità esecutiva, assicurando la continuità degli apparati decorativi storici.

C02 Esito finale e contributo al modello

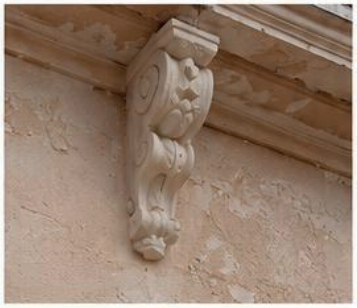
Il processo integrato ha consentito la reintegrazione dei fregi decorativi attraverso la continuità informativa tra rilievo, modello digitale, produzione e posa in opera, restituendo coerenza morfologica e valore all'apparato decorativo.

1. RISULTATO COSTRUITO



DETTAGLIO FREGIO RICOSTRUITO

Continuità formale e materica del motivo floreale.



DETTAGLIO MENSOLA RICOSTRUITA

Ripristino della funzione strutturale e decorativa.



VISTA COMPLESSIVA

Reintegrazione completa del fregio e delle mensole.

2. VERIFICA DELL'ESITO

CONTINUITÀ MORFOLOGICA
Il disegno del motivo floreale è coerente con il linguaggio originario.

COERENZA PROPORZIONALE
Le proporzioni e le relazioni dimensionali sono state mantenute.

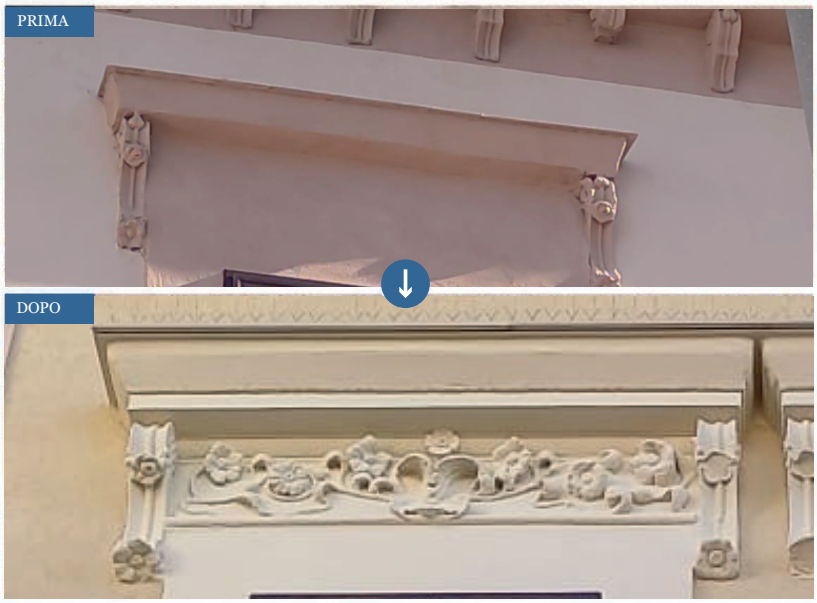
COMPATIBILITÀ GEOMETRICA
Gli elementi ricostruiti risultano allineati e integrati con quelli esistenti.

INTEGRAZIONE MATERICA
La finitura e il colore sono compatibili con il materiale originario.

RICONOSCIBILITÀ DELL'APPARATO
L'apparato decorativo risulta nuovamente leggibile e continuo.

CORRISPONDENZA MODELLO / OPERA
Elevata corrispondenza tra modello digitale e componente posato in opera.

3. CONFRONTO PRIMA / DOPO

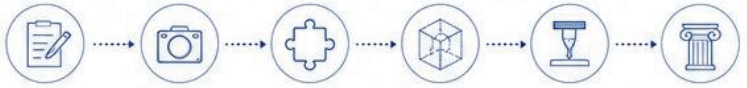


4. CONTRIBUTO AL MODELLO DI RICERCA

Il caso C02 documenta l'estensione del processo digitale dalla fase progettuale alla produzione e alla costruzione.

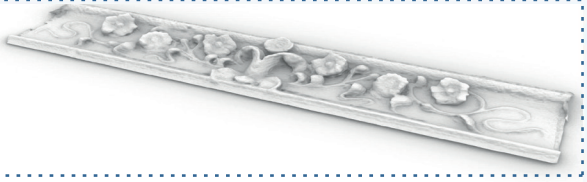
Le informazioni ricavate dalla preesistenza sono state trasformate in modelli geometrici, componenti producibili e indicazioni operative per il cantiere.

La continuità informativa ha consentito di coordinare ricostruzione delle lacune, scomposizione esecutiva, produzione CNC e posa in opera, mantenendo coerenza tra il manufatto rilevato e l'esito costruito.



INSIGHT FINALE

Il modello digitale ha operato come infrastruttura di continuità tra conoscenza del manufatto, produzione del componente e reintegrazione in cantiere.



6 | PARTE SESTA
CONCLUSIONI

6.1 CONCLUSIONI

La ricerca è stata impostata per chiarire se la digitalizzazione del processo edilizio dovesse essere letta come aggiornamento tecnico di pratiche già consolidate oppure come fattore capace di incidere sull'organizzazione complessiva della filiera, sul rapporto tra le sue fasi e sulle modalità con cui informazioni, decisioni e verifiche vengono costruite e trasmesse nel tempo. Da questa domanda iniziale sono derivati gli obiettivi del lavoro: esaminare criticamente il quadro normativo e procedurale, approfondire la trasformazione della fase progettuale, verificare gli effetti della digitalizzazione nelle fasi di produzione e costruzione, e definire una lettura complessiva del digitale come infrastruttura di riconfigurazione del processo edilizio. Le domande formulate nell'introduzione hanno tradotto tale impianto in cinque linee di indagine: l'organizzazione del processo, i limiti del quadro normativo italiano, il ruolo di dati e intelligenza artificiale nella decisione progettuale, l'integrazione tra produzione, costruzione e gestione, e il significato generale della digitalizzazione rispetto al governo dell'intero processo.

Research Question 1: in che modo l'introduzione degli strumenti digitali modifica l'organizzazione del processo edilizio, le relazioni tra le sue fasi e le procedure attraverso cui esse vengono controllate e verificate?

La ricerca ha portato a riconoscere che la digitalizzazione interviene sulla struttura del processo prima ancora che sui singoli strumenti. La trasformazione più evidente riguarda il passaggio da una sequenza di fasi trattate come ambiti relativamente separati a una catena più continua, nella quale ogni decisione produce dati, controlli e verifiche che incidono sui passaggi successivi. La progettazione viene così letta in rapporto più stretto con la produzione del compo-

nente, la costruzione viene collegata ai modelli e ai dati che la precedono, la gestione entra nel processo come sede di monitoraggio e di ritorno informativo. Ciò che cambia riguarda l'organizzazione del processo, le modalità di verifica e i criteri attraverso cui esso viene corretto.
La digitalizzazione rende più leggibili i nessi tra le fasi, intensifica la continuità informativa e consolida una logica di aggiornamento progressivo che sostituisce l'idea di successione rigida con quella di coordinamento dinamico.

Research Question 2: quali limiti del quadro normativo e procedurale italiano incidono sull'integrazione degli strumenti digitali nel processo edilizio e quali direzioni di aggiornamento assumono maggiore rilevanza?

L'analisi ha messo in luce un limite di fondo: il quadro normativo e procedurale continua a descrivere il processo edilizio secondo una partizione per fasi, adempimenti e responsabilità che riflette un'organizzazione lineare della filiera. Questa impostazione entra in tensione con un processo sempre più fondato su interoperabilità, ambienti collaborativi, aggiornamento dei modelli, tracciabilità delle modifiche e circolazione continua delle informazioni. Il problema riguarda la struttura stessa con cui molte regole sono formulate, ancora legata a una logica che recepisce con difficoltà processi interconnessi, verifiche distribuite e flussi informativi continui.
La direzione di aggiornamento che emerge con maggiore chiarezza riguarda proprio questo scarto: occorre una cornice capace di governare continuità informativa, coordinamento tra attori, responsabilità sulle modifiche, uso strutturato dei dati e integrazione tra momenti che la disciplina tradizionale ha trattato come blocchi distinti.

Research Question 3: in che modo dati, modelli informativi, sistemi di intelligenza artificiale e dispositivi comunicativi possono contribuire alla formulazione di decisioni progettuali più consapevoli, verificabili e coerenti con i bisogni espressi dagli utenti?

Su questo punto la ricerca ha mostrato che la progettazione può essere costruita su una base conoscitiva più ampia e più controllabile rispetto a quella affidata soltanto all'interpretazione informale delle esigenze. La raccolta organizzata delle informazioni sugli utenti, sulle abitudini, sui desideri e sui feedback consente di trattare tali contenuti come dati leggibili e confrontabili, utili per orientare le scelte progettuali. I modelli informativi e gli strumenti di analisi permettono di mettere in relazione queste informazioni con criteri spaziali, distributivi e prestazionali; i dispositivi comunicativi e immersivi rendono il progetto più comprensibile prima della sua realizzazione; l'intelligenza artificiale, impiegata come supporto all'analisi e alla restituzione dei dati, amplia la capacità di interpretare insiemi informativi eterogenei e di trasformarli in indicazioni utili alla decisione. La fase progettuale viene così ridefinita come ambiente di costruzione della conoscenza, nel quale dati, modelli e strumenti di comunicazione concorrono a una formulazione più consapevole, verificabile e discussa del progetto.

Research Question 4: in che misura le fasi di produzione, costruzione e gestione possono essere ricondotte a una struttura informativa integrata, capace di connettere in modo coerente modello, componente, esecuzione e monitoraggio nel tempo?

La ricerca ha confermato che questa integrazione costituisce una possibilità concreta e, in molti casi, una necessità metodologica. La produzione digitale collega il modello alla definizione del componente attraverso configurazione pa-

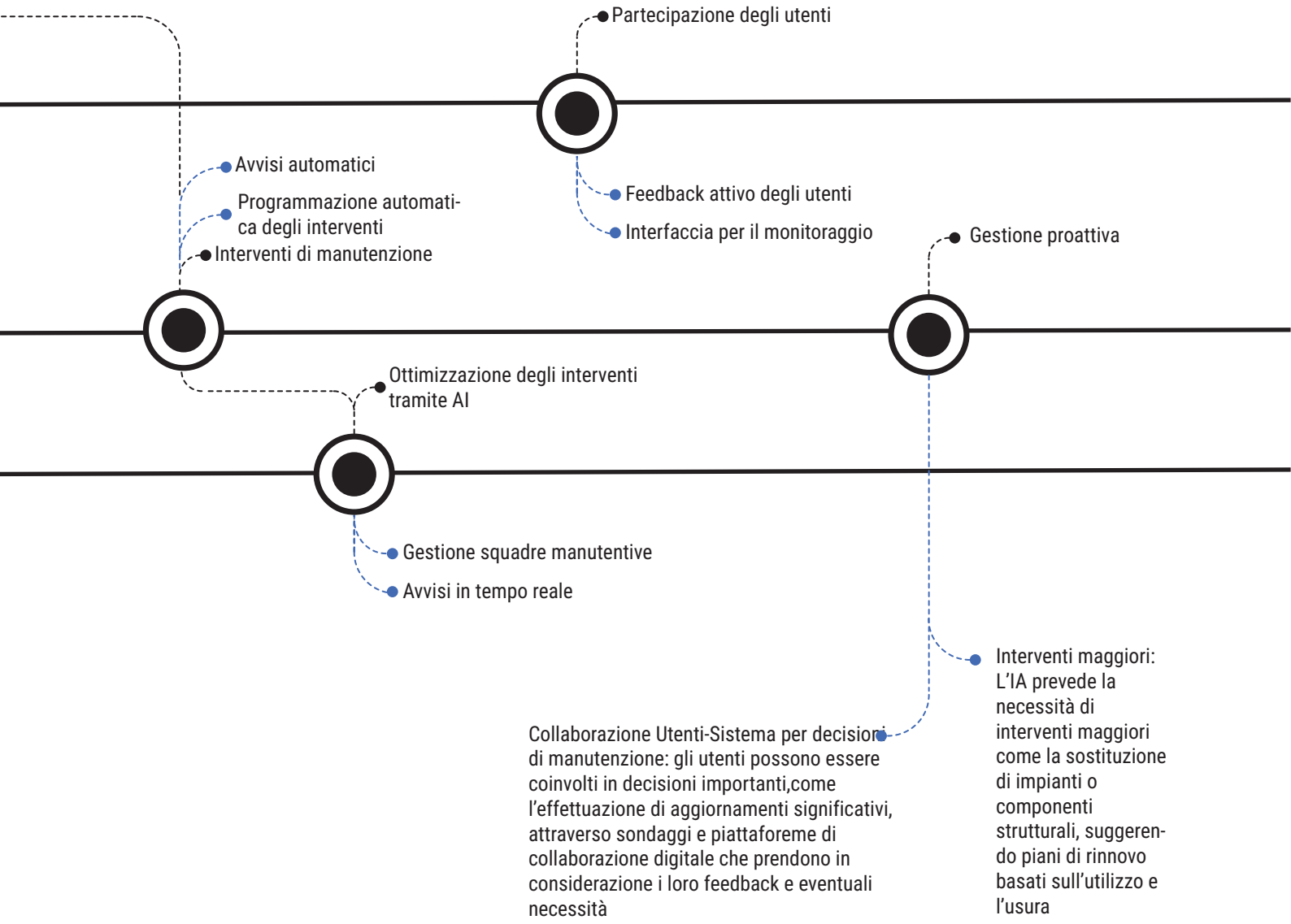
rametrica, valutazioni prestazionali, controllo dei processi e ottimizzazione delle soluzioni. La costruzione collega il componente all'esecuzione attraverso simulazioni, pianificazione, logistica, sistemi di supporto al montaggio e controllo in tempo reale. La gestione collega l'opera costruita al monitoraggio delle sue prestazioni, all'individuazione delle anomalie, alla programmazione degli interventi e alla raccolta di informazioni utili per gli adattamenti futuri. Lungo questa catena, modello, componente, cantiere e uso dell'edificio entrano in relazione entro una struttura informativa unitaria. Il processo edilizio emerge quindi come sistema continuo, nel quale la qualità della connessione tra le fasi incide direttamente sulla qualità della decisione, dell'esecuzione e della gestione nel tempo.

Research Question 5: quale significato assume la digitalizzazione nel processo edilizio: aggiornamento strumentale delle pratiche esistenti oppure condizione per una più ampia riorganizzazione del processo, dei soggetti coinvolti e delle forme di controllo che lo regolano?

Gli esiti della ricerca consentono di attribuire alla digitalizzazione un significato più ampio dell'adozione di nuovi strumenti. Il digitale interviene infatti sul modo in cui il processo viene pensato, organizzato e governato. Modifica il rapporto tra i soggetti coinvolti, attribuisce maggiore peso alla costruzione e alla gestione del dato, rende più stretta la connessione tra decisione e verifica, prolunga il valore informativo dell'opera nella fase d'uso e rende più evidente la necessità di un coordinamento continuo tra progettazione, produzione, costruzione e gestione. La digitalizzazione, dunque, coincide con una trasformazione della grammatica interna del processo edilizio: ridefinisce i criteri con cui le fasi si connettono, i modi in cui i controlli vengono distribuiti e il ruolo delle informazioni nel sostenere le decisioni. È

questo il risultato interpretativo più rilevante della tesi.
La sintesi finale di tali esiti è restituita dal diagramma di flusso elaborato nel corso della ricerca, che raccoglie in forma unitaria la struttura del processo edilizio digitalizzato emersa nei capitoli precedenti.Il diagramma costituisce il risultato conclusivo del ragionamento sviluppato nella tesi: rende visibile la continuità tra progettazione, produzione, costruzione e gestione e mostra come ciascuna fase si connetta alle altre attraverso dati, modelli, verifiche, feedback e dispositivi di controllo.
Nella sua formulazione finale, esso organizza la fase progettuale attorno alla raccolta delle informazioni, all'analisi degli utenti e alla generazione del modello; la fase produttiva attorno alla configurazione del componente, all'ottimizzazione e al controllo del processo; la fase costruttiva attorno alla pianificazione, al montaggio, al monitoraggio e alla correzione operativa; la fase gestionale attorno alla manutenzione predittiva, al controllo delle prestazioni e al coinvolgimento attivo degli utenti. Il diagramma traduce così in forma sintetica la conclusione principale del lavoro: il processo edilizio contemporaneo richiede una lettura unitaria, informativa e adattiva, nella quale il valore delle singole fasi dipende dalla qualità delle relazioni che esse riescono a costruire nel tempo.

Osservato nel suo insieme, il diagramma (Fig. 6) conferma che la rilettura proposta dalla tesi riguarda l'intero processo edilizio e il modo in cui esso viene compreso, organizzato e governato. La ricerca giunge così a una conclusione precisa: la digitalizzazione apre una ristrutturazione del processo fondata su continuità informativa, coordinamento tra le fasi, capacità di apprendere dai dati e possibilità di mantenere nel tempo un legame coerente tra progetto, produzione, costruzione, gestione e trasformazione dell'opera.


Partecipazione degli utenti
Avvisi automatici
Programmazione automatica degli interventi
Interventi di manutenzione
Feedback attivo degli utenti
Interfaccia per il monitoraggio
Gestione proattiva
Ottimizzazione degli interventi tramite AI
Gestione squadre manutentive
Avvisi in tempo reale
Collaborazione Utenti-Sistema per decisioni di manutenzione: gli utenti possono essere coinvolti in decisioni importanti,come l'effettuazione di aggiornamenti significativi, attraverso sondaggi e piattaforeme di collaborazione digitale che prendono in considerazione i loro feedback e eventuali necessità
Interventi maggiori: L'IA prevede la necessità di interventi maggiori come la sostituzione di impianti o componenti strutturali, suggerendo piani di rinnovo basati sull'utilizzo e l'usura

6.2 CONTRIBUTO DELLA TESI

Il contributo della tesi si definisce lungo tre direttrici strettamente intrecciate: teorica, metodologica e sperimentale. La prima riguarda la costruzione di una lettura del processo edilizio capace di tenere insieme progettazione, produzione, costruzione e gestione entro un quadro unitario. La seconda riguarda la messa a punto di un metodo che connette raccolta dei dati, interpretazione delle informazioni, sviluppo del progetto, comunicazione, produzione del componente, supporto alla costruzione e continuità informativa nella gestione. La terza riguarda la verifica di questo impianto attraverso applicazioni, prototipi e casi sperimentali. La distinzione tra i tre livelli risponde a una scelta espositiva; sul piano della ricerca essi concorrono a un unico avanzamento, fondato sulla ridefinizione del processo edilizio alla luce della transizione digitale.

6.2.1 CONTRIBUTI TEORICI

Il primo contributo teorico della tesi consiste nell'aver riformulato il processo edilizio come sistema continuo, composto da fasi distinte e insieme reciprocamente dipendenti. Il lavoro chiarisce che la trasformazione digitale modifica il rapporto tra le fasi della filiera e rende più evidente il peso delle connessioni che legano decisione, esecuzione, controllo, uso e aggiornamento dell'opera nel tempo. La progettazione orienta la produzione con un grado di precisione maggiore; la produzione condiziona la costruzione attraverso dati, modelli e procedure di controllo; la gestione restituisce informazioni che incidono sulla comprensione del progetto, delle prestazioni e delle trasformazioni future. La tesi riordina questi legami entro una lettura unitaria del processo edilizio e ne mette in evidenza le implicazioni sul piano organizzativo, cognitivo e normativo.

Un secondo contributo teorico riguarda il significato attribuito alla digitalizzazione. La ricerca chiarisce che il digitale interviene sulla forma del processo e sul modo in cui esso viene compreso, organizzato e governato. Il suo rilievo riguarda la produzione e la circolazione delle informazioni, la tracciabilità delle decisioni, la qualità dei controlli, la costruzione degli ambienti collaborativi e il rapporto tra modello, componente, cantiere e gestione. La digitalizzazione viene quindi assunta come infrastruttura processuale: un insieme di dispositivi, ambienti e procedure che riorganizza i rapporti tra fasi e soggetti e che conferisce nuova consistenza alla continuità informativa lungo l'intero ciclo di vita dell'opera.
Un terzo contributo teorico consiste nell'aver ricondotto entro un medesimo quadro interpretativo ambiti che spesso vengono trattati separatamente: partecipazione degli utenti, organizzazione dei dati, intelligenza artificiale, comunicazione immersiva del progetto, fabbricazione digitale, cantierizzazione aumentata, digital twin e manutenzione predittiva. La tesi mostra che questi temi acquistano piena intelligibilità quando vengono osservati come parti di una stessa catena processuale. Il loro rilievo deriva dalla capacità di concorrere a una struttura più coordinata, più leggibile e più controllabile del processo edilizio.
Un ulteriore contributo teorico riguarda la ridefinizione della fase progettuale. La ricerca chiarisce che la progettazione può essere letta come processo di costruzione della conoscenza fondato su raccolta, organizzazione, interpretazione e restituzione di informazioni relative agli utenti, ai comportamenti, ai bisogni e alle condizioni d'uso. La centralità dell'utente viene così tradotta in un problema operativo di acquisizione dei dati, di verifica delle scelte e di costruzione di ambienti progettuali più consapevoli. Da questa impostazione discende anche il fondamento teorico della proposta di aggiornamento normativo sviluppata nelle pagine successive, che trae la propria necessità da una trasformazione già

riconoscibile sul piano del processo.
Nel loro insieme, questi contributi teorici producono un avanzamento preciso: la tesi offre una lettura del processo edilizio contemporaneo che supera l'isolamento disciplinare delle singole fasi e restituisce una struttura più coerente con la complessità delle pratiche digitali, con la crescente centralità dei dati e con l'esigenza di mantenere legame e continuità tra decisione progettuale, realizzazione materiale e gestione nel tempo.

6.2.1 CONTRIBUTI TEORICI

Il contributo metodologico della tesi consiste nella definizione di un impianto che connette raccolta dei dati, interpretazione delle informazioni, sviluppo del progetto, comunicazione, produzione del componente, supporto alla costruzione e continuità informativa nella gestione. Il metodo costruito nel corso della ricerca si definisce come una sequenza operativa nella quale ogni fase produce informazioni utili alla successiva e riceve, a sua volta, verifiche e correzioni dai passaggi che seguono. Il suo valore risiede nella capacità di tenere insieme momenti che, nelle pratiche correnti, tendono a essere trattati in modo autonomo.
Il primo carattere di questo metodo è l'integrazione. La metodologia proposta mette in relazione dati provenienti dagli utenti, strumenti di organizzazione delle informazioni, modelli digitali, ambienti immersivi, dispositivi di analisi e sistemi di supporto alla decisione entro una struttura coerente. Le informazioni sugli utenti e sulle condizioni d'uso vengono raccolte e organizzate in forma leggibile; tali dati vengono interpretati e tradotti in indicazioni utili alla progettazione; il progetto viene quindi comunicato e verificato attraverso ambienti capaci di anticipare la comprensione spaziale; le fasi successive della filiera entrano in continuità con questo patrimonio informativo. L'integrazione definisce quindi il cuore

metodologico della tesi: una catena di passaggi in cui dato, modello, decisione e verifica si sostengono reciprocamente.
Il secondo carattere è l'adattabilità. Il metodo è stato costruito in modo da poter essere ricalibrato in funzione di contesti diversi, scale differenti, tipologie di intervento variabili e livelli disomogenei di disponibilità informativa. La sua stabilità deriva dalla permanenza di una logica di fondo:

- acquisire
- strutturare
- interpretare
- restituire
- verificare

mentre gli strumenti, i contenuti e il grado di approfondimento possono essere modulati in relazione al caso specifico. Questo aspetto conferisce al metodo una buona trasferibilità, perché ne conserva l'ossatura e insieme consente una regolazione fine rispetto alle condizioni operative.
Il terzo carattere è la scalabilità. La metodologia può essere applicata a interventi circoscritti, caratterizzati da un numero ridotto di utenti, da una limitata quantità di dati e da una complessità processuale contenuta; allo stesso tempo, può essere estesa a contesti più articolati, nei quali crescono il numero degli attori, la densità informativa e il fabbisogno di coordinamento. La sua scalabilità dipende dalla possibilità di mantenere coerente l'architettura del processo quando cambiano dimensione, intensità e articolazione delle informazioni. Il metodo conserva quindi validità sia in applicazioni di piccola scala sia in scenari più complessi, nei quali la continuità tra dati, modelli, decisioni, produzione ed esecuzione assume un peso ancora maggiore.
Un ulteriore contributo metodologico riguarda il rapporto tra analisi e comunicazione. La ricerca mostra che dati e modelli producono effetti realmente utili quando diventano comprensibili, verificabili e discutibili da parte dei soggetti coinvolti. Per questa ragione, gli strumenti di visualizzazio-

ne, gli ambienti immersivi e i dispositivi di feedback entrano pienamente nel metodo. Il loro compito consiste nel rendere l'informazione condivisibile e nel trasformarla in contenuto operativo. La metodologia proposta unisce così dimensione analitica e dimensione comunicativa entro una stessa struttura e rafforza, con ciò, la qualità delle decisioni e la leggibilità del processo.
Il contributo metodologico della tesi si definisce quindi attraverso una proprietà composita: integrazione delle fasi, adattabilità rispetto ai contesti, scalabilità lungo diverse scale operative e capacità di trasformare il dato in conoscenza utilizzabile. È su questa base che il metodo costruito nella ricerca acquisisce consistenza e offre una possibile linea di lavoro trasferibile anche oltre i casi direttamente affrontati.

6.2.3 CONTRIBUTI SPERIMENTALI

Il contributo sperimentale della tesi consiste nell'aver verificato l'impianto teorico e metodologico attraverso applicazioni concrete, prototipi e ambienti di test riferiti a diverse fasi del processo edilizio. La ricerca assume così un valore che supera il piano puramente interpretativo, poiché sottopone le proprie ipotesi a una verifica applicativa e costruisce dispositivi operativi attraverso cui osservarne la tenuta.
Nel campo della progettazione, il lavoro ha sviluppato un sistema fondato su raccolta strutturata delle informazioni, organizzazione dei dati, supporto all'interpretazione e restituzione di indicazioni utili alla formulazione progettuale. Questo passaggio ha consentito di verificare che la partecipazione degli utenti produce risultati più solidi quando viene ricondotta a procedure leggibili di acquisizione, trattamento e restituzione delle informazioni. Il contributo sperimentale, in questo ambito, consiste nell'aver trasformato un principio teorico — la centralità dell'utente — in una sequenza operativa verificabile, capace di generare contenuti utili alla costru-

zione del progetto.
Nel campo della comunicazione, la tesi ha sperimentato ambienti immersivi e dispositivi AR/VR finalizzati a rendere il progetto esplorabile prima della realizzazione, a migliorare la comprensione spaziale e a raccogliere feedback anticipati. Queste prove hanno mostrato che la comunicazione del progetto può essere trattata come fase interna al processo, dotata di una funzione tecnica e cognitiva ben definita. Il loro rilievo riguarda la possibilità di introdurre forme più efficaci di verifica, confronto e comprensione condivisa delle soluzioni proposte.
Nel campo della produzione e della costruzione, la ricerca ha affrontato temi quali configurazione parametrica, supporto alla cantierizzazione, digital twin, monitoraggio e montaggio assistito, fino alla sperimentazione sviluppata nel caso RE-Bridge. In questo ambito, il contributo sperimentale consiste nell'aver mostrato come il legame tra modello, componente, cantiere e gestione possa essere costruito in modo più stretto attraverso una catena di strumenti e controlli capace di accompagnare il processo lungo fasi differenti e di restituire continuità operativa e informativa.
Il valore complessivo della dimensione sperimentale risiede nella coerenza tra i diversi ambiti applicativi affrontati. I prototipi e le sperimentazioni si configurano come verifiche convergenti di una medesima impostazione: il digitale produce effetti rilevanti quando viene organizzato come ambiente di continuità tra conoscenza, progetto, produzione, costruzione e gestione.
Questa coerenza tra impianto teorico, costruzione metodologica e verifica sperimentale definisce il contributo più solido della tesi sul piano applicativo e conferisce al lavoro una consistenza che va oltre la sola proposta interpretativa.

6.3 LIMITI DELLA RICERCA E SVILUPPI FUTURI

L'ampiezza del campo affrontato costituisce uno degli elementi che definiscono il profilo della ricerca. La tesi segue la trasformazione digitale lungo più fasi del processo edilizio, mettendo in relazione quadro normativo, progettazione, produzione e costruzione entro una medesima chiave interpretativa. Questa scelta ha consentito di costruire una visione unitaria del problema e di chiarire con sufficiente precisione i rapporti tra strumenti, dati, decisioni e forme di coordinamento. Una simile estensione ha richiesto, al tempo stesso, una selezione dei temi e ha determinato livelli di approfondimento differenti tra i vari nuclei del lavoro. La valutazione dei risultati raggiunti dipende quindi anche dalla precisa definizione del perimetro entro cui essi sono stati costruiti.

La parte della ricerca che ha raggiunto una maggiore definizione riguarda la fase progettuale, la raccolta e l'interpretazione dei dati, la costruzione di dispositivi per la comunicazione del progetto e alcuni passaggi riferiti alla produzione digitale e alla costruzione assistita. Qui il lavoro è arrivato a chiarire una linea metodologica riconoscibile, ha costruito strumenti, ha verificato procedure e ha reso osservabili alcune relazioni che nel dibattito restano spesso enunciate in termini generali. In altri ambiti il livello di sviluppo è meno avanzato. La tesi ne ha delineato la necessità, ne ha mostrato la coerenza rispetto al modello complessivo e ne ha chiarito il ruolo entro una lettura integrata del processo, mentre la formalizzazione operativa richiede ancora un passaggio ulteriore. Questa differenziazione interna appartiene alla struttura del lavoro e richiede una formulazione esplicita, perché consente di distinguere ciò che è stato già verificato con maggiore profondità da ciò che viene indicato come linea di sviluppo successiva.

Anche sul piano sperimentale, la ricerca ha prodotto applicazioni e prototipi che hanno consentito di verificare la tenu-

ta dell'impianto generale e di osservare, in passaggi specifici della filiera, il funzionamento di una logica del processo edilizio più continua e più informata. Resta però ancora aperta la distanza tra sperimentazione controllata e procedura pienamente stabilizzata. Il lavoro ha costruito ambienti di test, ha messo in relazione dati, modelli e dispositivi di supporto, ha verificato passaggi significativi nella costruzione del progetto e nel rapporto tra modello e costruzione. La trasformazione di questi risultati in pratiche estese, ripetibili e ordinarie richiede però una casistica più ampia, tempi di osservazione più lunghi e condizioni operative meno controllate di quelle affrontate nella tesi.

Anche la questione della casistica merita di essere considerata con attenzione. I casi selezionati permettono di argomentare con forza la coerenza del metodo e di mostrare il valore del modello nei punti principali del discorso, senza però esaurire la varietà delle situazioni in cui esso potrebbe essere applicato. Il comportamento del metodo in programmi edilizi differenti, in contesti con maggiore complessità organizzativa o in presenza di una pluralità più ampia di attori richiede ancora un confronto diretto. Una verifica di questo tipo sarà decisiva per chiarire con maggiore nettezza quali elementi appartengano alla struttura stabile dell'impianto e quali, invece, richiedano adattamenti in funzione del contesto, della scala e della natura dell'intervento.

Un limite di maggiore rilievo riguarda il dato, che nella tesi assume una funzione centrale. La ricerca ha evidenziato che la qualità del processo dipende in misura crescente dalla qualità delle informazioni raccolte, dalla loro organizzazione, dalla loro leggibilità e dalla capacità di assicurarne continuità e coerenza attraverso fasi differenti. Per questa ragione, la tenuta complessiva dell'impianto dipende in modo diretto dalla solidità dell'infrastruttura informativa. Permangono criticità relative alla qualità dei dataset, alla comparabilità tra casi eterogenei, alla durata delle informazioni nel tempo,

all'interoperabilità tra ambienti e all'affidabilità delle procedure di aggiornamento. La tesi ha chiarito l'incidenza di tali aspetti e ne ha evidenziato il rilievo metodologico; il pieno consolidamento del sistema richiede un ulteriore sviluppo, in particolare quando l'obiettivo consiste nel garantire una continuità effettiva dei flussi informativi lungo l'intera filiera.
A questo nodo si associa il tema della governance delle informazioni, che la ricerca porta in primo piano senza ricondurlo a una trattazione definitiva. Una filiera organizzata intorno a dati, modelli e aggiornamenti continui richiede una definizione rigorosa delle responsabilità: l'individuazione dei soggetti che raccolgono le informazioni, di quelli che le validano e le modificano, la precisazione della fase in cui avviene il passaggio tra ambienti differenti e la valutazione degli effetti che tale passaggio produce sul processo successivo. Queste questioni coinvolgono in modo diretto la pratica professionale, la gestione dei modelli, la continuità tra progettazione e costruzione e, in prospettiva, il rapporto con la gestione dell'opera. La tesi ne chiarisce la centralità e ne mette in evidenza la rilevanza; la traduzione di questi aspetti in protocolli stabili richiede un confronto più ampio con le condizioni effettive del lavoro professionale e con le forme concrete di coordinamento tra soggetti diversi.
In questo quadro si inserisce anche il tema della gestione dell'opera. La ricerca ne riconosce il rilievo teorico e la piena coerenza rispetto al modello complessivo del processo edilizio digitalizzato, ma non giunge ancora a una verifica sperimentale comparabile a quella sviluppata per la progettazione, la produzione e la costruzione. La gestione e la manutenzione predittiva entrano quindi nella tesi come una direzione di sviluppo già riconoscibile e necessaria, più che come un risultato ormai consolidato. Questo passaggio richiede una formulazione esplicita, poiché la solidità del modello dipende anche dalla chiarezza con cui si distinguono gli esiti acquisiti dalle estensioni che richiedono ancora elaborazione.

Una considerazione analoga vale per la proposta normativa. La tesi arriva a definire una linea di aggiornamento fondata su argomenti teorici, metodologici e sperimentali coerenti. La sua ricezione entro procedure reali, assetti amministrativi e pratiche professionali appartiene però a un livello ulteriore, che richiede confronto con istituzioni, attori e contesti applicativi più ampi di quelli direttamente affrontati dalla ricerca. Anche qui il limite coincide con la scala del problema: la tesi costruisce la base critica e metodologica necessaria, mentre la verifica della sua piena traducibilità operativa appartiene a un passaggio successivo.

Da questi limiti derivano con sufficiente chiarezza anche gli sviluppi futuri della ricerca. Il primo riguarda l'estensione del metodo a una casistica più ampia e più differenziata. Solo un confronto con interventi di natura diversa, con scale differenti e con contesti più complessi permetterà di misurare con rigore la trasferibilità dell'impianto e di definirne meglio il grado di adattabilità. Questo sviluppo appare particolarmente importante perché riguarda la tenuta complessiva del metodo e la sua capacità di operare oltre i casi che ne hanno permesso la costruzione iniziale.

Un secondo sviluppo riguarda il rafforzamento del sistema di raccolta, organizzazione e interpretazione dei dati nella fase progettuale. La tesi ha già mostrato quanto questa componente sia decisiva per orientare le scelte e per costruire un rapporto più saldo tra partecipazione, informazione e progetto. Il passo successivo consiste nel rendere questo sistema più stabile, più confrontabile tra casi diversi e più preciso nelle sue procedure di validazione. Un avanzamento in questa direzione consoliderebbe ulteriormente il nucleo metodologico del lavoro.

Anche la comunicazione del progetto configura una linea di sviluppo coerente. Le sperimentazioni condotte mostrano con chiarezza che gli ambienti immersivi possono migliorare la comprensione spaziale, la qualità dell'interazione con gli

utenti e la capacità di anticipare le verifiche. Risulta ora necessario approfondire la costruzione di ambienti più stabili, più accessibili e maggiormente integrati con i modelli informativi, così da renderli una componente sempre più ordinaria del processo decisionale.

La stessa esigenza di approfondimento riguarda il rapporto tra produzione e costruzione. La tesi ha mostrato il valore della configurazione parametrica, del digital twin, del monitoraggio e del supporto digitale al montaggio nei punti in cui tali strumenti risultano più efficaci per costruire continuità tra modello, componente e cantiere. Un'estensione della ricerca in contesti più articolati permetterà di osservare il comportamento di questi strumenti entro scenari di maggiore complessità operativa. In questo quadro trova una collocazione particolarmente significativa anche l'approfondimento del caso RE-Bridge, che offre un terreno adatto per verificare la continuità tra progetto, fabbricazione, costruzione, riuso e organizzazione del processo lungo più fasi della filiera.

La gestione dell'opera e la manutenzione predittiva costituiscono il passaggio successivo più evidente. La tesi ne ha chiarito il rilievo e ne ha mostrato la coerenza rispetto al modello generale; resta ora da sviluppare in modo specifico il monitoraggio in esercizio, la raccolta dei dati d'uso, l'individuazione delle anomalie, la previsione dei cicli di intervento e il ruolo del feedback nella fase gestionale. È in questa direzione che il modello costruito dal lavoro potrà trovare il proprio completamento, estendendo alla gestione quella continuità informativa già definita con maggiore precisione nelle fasi precedenti.

Anche la proposta normativa apre un campo di lavoro ulteriore. Il confronto con casi reali, con procedure esistenti e con condizioni concrete di attuazione permetterà di valutarne la tenuta, di precisarne il campo di applicazione e di avvicinarla progressivamente alle pratiche effettive del settore. Questo sviluppo rappresenta il naturale prolungamento della tesi sul

piano istituzionale e regolativo.
Nel loro insieme, limiti e sviluppi futuri restituiscono un quadro preciso. La tesi ha costruito un impianto coerente, ha definito una linea interpretativa riconoscibile e ha prodotto un metodo che mostra una concreta possibilità di trasferimento. Allo stesso tempo, ha lasciato aperti passaggi che richiedono ulteriori verifiche, casi più ampi e un confronto più diretto con la pratica. La maturità del lavoro si misura anche in questo: nella capacità di definire con precisione ciò che è stato realmente raggiunto e di indicare, con la stessa precisione, ciò che il percorso di ricerca rende ora possibile approfondire.

6.4 AGGIORNAMENTO NORMATIVO DEL PROCESSO EDILIZIO DIGITALIZZATO

Il percorso sviluppato nella tesi conduce a una conclusione ormai difficilmente eludibile: il quadro normativo italiano continua a regolare il processo edilizio attraverso un impianto che conserva una forte matrice prescrittiva, una netta separazione tra le fasi e una limitata capacità di governare la continuità tra progetto, produzione, costruzione e uso dell'opera. Questa struttura ha avuto un ruolo storico importante: ha contribuito a definire soglie di sicurezza, procedure di controllo e responsabilità tecniche con una chiarezza che ha lasciato il segno sulla cultura edilizia italiana. Oggi, però, i suoi limiti si vedono con particolare evidenza proprio mentre il processo cambia forma: con i dati, i modelli informativi, gli strumenti di simulazione, gli ambienti digitali di coordinamento e i controlli distribuiti lungo tutta la filiera.

La ricerca ha mostrato che questo scarto deriva dalla struttura con cui il processo edilizio continua a essere descritto sul piano regolativo. L'ordinamento italiano organizza ancora la filiera come successione di segmenti relativamente autonomi, ciascuno definito da adempimenti specifici, verifiche localizzate e responsabilità spesso concentrate sul momento della conformità iniziale. In un assetto di questo tipo, la documentazione accompagna il passaggio da una fase all'altra senza costituire una struttura informativa continua; la memoria tecnica dell'opera si disperde con facilità; il monitoraggio in esercizio resta marginale; il rapporto tra uso reale, qualità percepita e aggiornamento del progetto trova uno spazio normativo ancora limitato rispetto al suo rilievo effettivo.
Il confronto con i Paesi scandinavi ha permesso di definire questa distanza con maggiore precisione, perché rende leggibile un diverso modo di intendere la regolazione edilizia. In questi contesti, la qualità ambientale interna, la gestione del

ciclo di vita, la tracciabilità dei materiali, l'aggiornamento dei logbook digitali, la post-occupancy evaluation, la responsabilità informativa e, in alcuni casi, la partecipazione dell'utenza rientrano in una stessa struttura regolativa. Da questo confronto emerge la possibilità di una norma capace di accompagnare l'opera nel tempo, di attribuire ai dati una funzione operativa e di costruire un legame più saldo tra prestazione dichiarata, verifica effettiva e gestione successiva.

Da questi esiti emerge la necessità di un aggiornamento normativo del processo edilizio digitalizzato. L'analisi sviluppata nella tesi mostra che la digitalizzazione ha modificato il rapporto tra le fasi, ha rafforzato la centralità delle informazioni, ha intensificato la connessione tra decisione e controllo, ha ampliato le possibilità di coordinamento e ha esteso il valore del progetto oltre la sua definizione iniziale. A fronte di queste trasformazioni, una regolazione ancora fondata su documenti statici, verifiche concentrate in passaggi specifici e una visione sostanzialmente lineare del processo mostra evidenti limiti di adeguatezza.

- Continuità informativa
- La prima esigenza riguarda la continuità informativa. La tesi mostra che il valore del processo edilizio contemporaneo dipende sempre più dalla possibilità di mantenere leggibili, aggiornabili e trasferibili le informazioni prodotte lungo l'intera filiera. In questa prospettiva, il dato entra nella struttura dell'opera e del suo ciclo di vita, e richiede quindi un riconoscimento normativo coerente. Un aggiornamento adeguato dovrebbe attribuire rilievo alla persistenza delle informazioni, alla tracciabilità delle modifiche, alla loro interoperabilità e alla capacità di accompagnare il passaggio da una fase all'altra senza perdita di qualità e di significato operativo.

- Rapporto tra requisito minimo e prestazione effettiva
- Un secondo aspetto riguarda il rapporto tra requisito minimo e prestazione effettiva. Il quadro italiano continua a fondarsi in larga misura su parametri dimensionali, soglie quantitative e controlli ex ante. Questa impostazione conserva una funzione precisa in diversi ambiti, ma incontra difficoltà quando deve governare qualità che emergono nell'uso, si modificano nel tempo e richiedono strumenti di osservazione più dinamici. La ricerca ha evidenziato questa criticità nei campi della qualità ambientale interna, della flessibilità d'uso, della manutenzione, della qualità percepita, dell'adattamento climatico e della gestione del ciclo di vita. L'aggiornamento normativo richiede quindi un riequilibrio: la conformità iniziale resta necessaria, ma va accompagnata da una maggiore attenzione alle condizioni reali dell'opera, alle sue prestazioni nel tempo e alla possibilità di verificarle oltre il momento autorizzativo e il collaudo.

- Responsabilità informativa
- Un terzo nodo riguarda la responsabilità. Una filiera organizzata attorno a modelli digitali, dati aggiornabili e ambienti collaborativi richiede una definizione più rigorosa dei soggetti che producono, validano, modificano e trasmettono le informazioni. La ricerca chiarisce che la qualità del processo digitalizzato dipende anche da questo assetto. Quando la titolarità del dato resta incerta, quando le modifiche non sono tracciate con chiarezza e quando il passaggio delle informazioni tra progettazione, costruzione e uso resta privo di una regolazione esplicita, l'intero sistema perde affidabilità. Un aggiornamento normativo efficace deve quindi intervenire anche su questo piano, chiarendo il rapporto tra competenze tecniche, responsabilità informative e continuità della documentazione lungo l'intero processo.

Accanto a questi aspetti, il lavoro ha mostrato con altrettanta chiarezza che la qualità edilizia non può più essere descritta in modo convincente senza riconoscere il peso della fase d'uso. La debolezza della cultura partecipativa, la marginalità delle verifiche post-occupancy, la limitata attenzione alla qualità percepita e l'assenza di strumenti normativi capaci di integrare stabilmente il feedback degli utenti segnalano un limite che oggi appare sempre più rilevante. La disponibilità di strumenti digitali per la raccolta, l'organizzazione e l'interpretazione delle informazioni rende possibile una diversa relazione tra norma e uso dell'opera. Questo richiede di riconoscere che l'edificio continua a produrre conoscenza anche dopo la conclusione del cantiere e che tale conoscenza può orientare manutenzione, adattamento e miglioramento.

Nel quadro italiano, i riferimenti al BIM, alla gestione informativa e alla digitalizzazione del processo hanno segnato un avanzamento importante, ma restano in larga misura concentrati su un piano procedurale. La tesi mostra che il cambiamento più incisivo si produce quando il modello entra in relazione con la costruzione del componente, con il controllo del cantiere, con il monitoraggio e, in prospettiva, con la gestione dell'edificio. In questa direzione, l'aggiornamento normativo richiede il riconoscimento del fatto che il valore dell'opera dipende sempre più anche dalla qualità del suo ambiente informativo, dalla sua trasparenza e dalla capacità di mantenere nel tempo una coerenza tra ciò che è stato progettato, ciò che è stato realizzato e ciò che viene effettivamente usato e trasformato.

L'aggiornamento normativo del processo edilizio digitalizzato richiede una revisione che agisca sulla struttura del processo prima ancora che sui suoi singoli strumenti.

- Norma e relazioni di processo
- La trasformazione digitale richiede una norma capace di governare il processo edilizio come sistema di relazioni e non come semplice successione di adempimenti separati. Questo significa attribuire rilievo alla continuità tra le fasi, alla distribuzione delle responsabilità, alla tracciabilità delle decisioni e alla verifica delle prestazioni lungo il tempo. Una regolazione di questo tipo deve saper accompagnare il passaggio delle informazioni, rendere leggibili i rapporti tra i soggetti coinvolti e sostenere forme di controllo più coerenti con la natura interconnessa del processo contemporaneo.

- Integrazione tra le fasi
- La ricerca evidenzia la necessità di una maggiore integrazione tra progetto, costruzione e uso dell'opera. Il valore del processo edilizio dipende sempre più dalla capacità di mantenere un legame stabile tra ciò che viene previsto in fase progettuale, ciò che viene realizzato in cantiere e ciò che emerge durante l'esercizio dell'edificio. In questa prospettiva, la separazione rigida tra le fasi riduce la qualità del coordinamento e indebolisce la possibilità di correggere, aggiornare e migliorare l'opera sulla base delle informazioni che essa produce nel tempo.

- Disciplina del dato
- Un altro punto riguarda la necessità di una disciplina più chiara del dato, del suo aggiornamento e della sua trasmissione. In un processo edilizio digitalizzato, il dato entra direttamente nella costruzione, nel controllo e nella gestione dell'opera. Per questa ragione, occorre chiarire

chi lo produce, chi lo valida, chi può modificarlo, in che modo tali modifiche vengono tracciate e secondo quali modalità le informazioni passano da una fase all'altra. La qualità del processo dipende infatti anche dalla stabilità di questa infrastruttura informativa e dalla sua capacità di mantenere coerenza, leggibilità e affidabilità lungo l'intero ciclo di vita.

- Nozione di qualità edilizia
- La transizione digitale richiede infine una nozione di qualità edilizia più ampia, più aderente all'esperienza reale e più coerente con le possibilità offerte dagli strumenti contemporanei. La qualità dell'opera non può essere ricondotta esclusivamente al rispetto iniziale di parametri dimensionali o prescrizioni statiche, ma deve comprendere anche il comportamento dell'edificio nell'uso, la sua capacità di adattamento, la qualità ambientale interna, la manutenzione, la leggibilità delle informazioni e la possibilità di verificare nel tempo le prestazioni effettive. In questo senso, la digitalizzazione apre la possibilità di una lettura della qualità più dinamica, più continua e più vicina alle condizioni reali di funzionamento dell'opera.

La tesi riconosce la necessità di mantenere il quadro esistente e di conservare l'articolazione del processo in momenti distinti. Mostra però che la struttura normativa attuale non dispone più di strumenti sufficienti per descrivere e governare il processo edilizio nella configurazione che esso sta assumendo. Da questa consapevolezza deriva il passaggio successivo: la definizione di una proposta di integrazione normativa capace di tradurre sul piano regolativo le acquisizioni teoriche, metodologiche e sperimentali emerse nel corso della ricerca.

6.5 PROPOSTA DI INTEGRAZIONE NORMATIVA

Gli esiti della ricerca consentono di formulare alcune indicazioni per un possibile aggiornamento della UNI 10838. La proposta mantiene l'impianto della norma e ne assume la struttura come base di riferimento. Il suo obiettivo è più circoscritto e, proprio per questo, più utile al quadro della tesi: individuare alcuni punti nei quali la norma potrebbe essere integrata per recepire in modo più coerente la trasformazione digitale del processo edilizio. Questa scelta nasce da una constatazione emersa con chiarezza nel corso del lavoro. La UNI 10838 conserva ancora oggi una funzione importante, perché offre una lettura ordinata del processo e ne distingue le fasi con sufficiente chiarezza. Il punto riguarda quindi il suo aggiornamento rispetto a un processo che oggi si presenta più continuo, più informato, più verificabile e più aperto alla circolazione dei dati lungo la filiera.

La proposta che segue assume quindi la UNI 10838 come riferimento e ne sviluppa alcune linee di integrazione coerenti con i risultati teorici, metodologici e sperimentali della ricerca. Il tema riguarda il rafforzamento di alcuni principi che la trasformazione digitale rende ormai centrali: la continuità informativa tra le fasi, la tracciabilità delle decisioni e delle modifiche, una maggiore integrazione tra progetto, produzione e costruzione, il riconoscimento del dato come parte del processo, la possibilità di attivare forme di verifica e di feedback nel tempo e una più chiara definizione delle responsabilità connesse alla gestione delle informazioni. È entro questa cornice che si collocano le indicazioni proposte.

6.5.1 PRINCIPI GUIDA

L'ipotesi di integrazione della UNI 10838 richiede una precisazione preliminare sul piano del metodo. La questione non investe soltanto l'aggiornamento di alcuni contenuti specialistici, né l'inserimento di riferimenti al digitale entro un impianto rimasto identico a se stesso. La ricerca ha mostrato che il nodo centrale riguarda il modo in cui la norma assume il processo edilizio come oggetto di regolazione. I principi guida chiariscono secondo quale logica la UNI 10838 possa essere riletta oggi, mantenendo la propria funzione ordinatrice e accogliendo, allo stesso tempo, una configurazione del processo molto più densa di relazioni, passaggi informativi, verifiche progressive e riallineamenti operativi.
La UNI 10838 conserva ancora oggi un valore preciso, perché continua a offrire una scansione chiara del processo edilizio e mantiene, per questa ragione, una funzione utile all'interno della tesi. La distinzione tra fasi resta un punto di forza, perché consente di ordinare compiti, responsabilità e prodotti attesi con una chiarezza che nel settore edilizio mantiene un'importanza rilevante.La ricerca orienta quindi verso una correzione interna della sua architettura generale. L'aggiornamento riguarda il modo in cui la norma descrive il rapporto tra le fasi. Il processo edilizio contemporaneo si definisce infatti sempre più attraverso la qualità delle connessioni che attraversano progettazione, produzione, costruzione e gestione.

- **Da una norma delle fasi a una norma dei passaggi.**
- La ricerca ha mostrato con chiarezza che molte criticità del processo si concentrano nei punti di transizione: nel trasferimento di un contenuto da una fase all'altra, nella sua traduzione operativa, nella sua verifica, nel suo aggiornamento. È in questi punti che si produce continuità oppure dispersione; è qui che una decisio-

ne tecnica conserva forza, la perde o si trasforma. Un aggiornamento della UNI 10838 dovrebbe quindi attribuire rilievo esplicito ai passaggi, alle soglie e ai raccordi, chiarendo che la qualità del processo edilizio dipende anche dalla precisione con cui ogni fase prepara la successiva e ne rende possibile l'assunzione operativa.

- **Natura degli output.**
- La norma, nella sua formulazione originaria, si concentra soprattutto sugli esiti tecnici delle singole fasi. La ricerca suggerisce di integrare questo impianto distinguendo con maggiore precisione tra output tecnico e output informativo. Ogni fase del processo produce elaborati, atti, componenti, verifiche, decisioni. Produce anche informazioni che mantengono valore oltre la fase che le ha generate: dati di base, criteri di scelta, revisioni, controlli intermedi, classificazioni, modifiche registrate, contenuti utili alla prosecuzione del lavoro. Una norma di processo aggiornata dovrebbe riconoscere questa duplice natura dell'output. Il punto non consiste nell'accumulare documentazione, ma nel chiarire che il processo edilizio costruisce progressivamente anche una base informativa che accompagna l'opera e ne sostiene la continuità.

- **Trasferimento.**
- Una filiera ordinata in fasi distinte acquista coerenza quando ciò che viene prodotto passa alla fase successiva con sufficiente chiarezza, completezza e leggibilità. La ricerca ha evidenziato che molte inefficienze, molte ridondanze e molte discontinuità si concentrano proprio nella qualità dei trasferimenti. Un'integrazione della UNI 10838 dovrebbe quindi riconoscere il trasferimento come funzione strutturale del processo, e non come semplice momento amministrativo di consegna. Questo significa porre attenzione a ciò che

viene trasmesso, alle condizioni della sua trasmissione, alla possibilità di assumerlo come base operativa e alla sua coerenza con gli esiti della fase precedente. In una norma di processo, il trasferimento rappresenta il punto in cui la continuità si rende verificabile.

- Verificabilità del processo.
- La ricerca ha evidenziato che la qualità dell'opera si definisce certamente nella correttezza delle decisioni iniziali, ma si chiarisce pienamente lungo il suo sviluppo, nel rapporto tra previsione e attuazione, nella stabilità delle scelte, nella leggibilità degli scostamenti e nella possibilità di registrarne gli effetti. Una norma aggiornata dovrebbe quindi rafforzare l'idea di una verifica che accompagna il processo nei suoi snodi principali e che permette di controllare la consistenza dei passaggi, la coerenza degli aggiornamenti e la tenuta delle decisioni assunte. In questo quadro anche il feedback acquista un significato diverso. La ricerca ha mostrato che costruzione, controllo operativo, comunicazione del progetto e, in prospettiva, uso dell'opera producono ritorni informativi capaci di chiarire l'efficacia delle decisioni. Il loro valore non risiede soltanto nella registrazione, ma nella possibilità di rendere il processo più leggibile e più consapevole.

In una filiera resa più densa dalla presenza di dati, revisioni e passaggi informativi continui, la responsabilità si estende anche alla formazione, alla validazione, all'aggiornamento e alla trasmissione delle informazioni che rendono possibile il lavoro successivo. La ricerca ha mostrato con chiarezza questo passaggio: la responsabilità supera il solo piano della correttezza dell'atto tecnico in senso stretto e coinvolge anche la qualità dei contenuti informativi che accompagnano il processo. La qualità del processo edilizio dipende, anche sotto questo profilo, dalla possibilità di riconoscere con

precisione chi produce un contenuto, chi lo assume, chi lo modifica e chi ne garantisce la coerenza nel passaggio alla fase seguente. In questa direzione, un aggiornamento della UNI 10838 potrebbe rendere più leggibile il rapporto tra contenuto tecnico e responsabilità informativa, così da collegare con maggiore precisione i soggetti coinvolti, gli esiti generati da ciascuna fase e le trasformazioni che attraversano l'intera filiera.
Nel loro insieme, questi orientamenti lasciano invariato l'impianto ordinatore della UNI 10838, che conserva ancora oggi una funzione utile nella lettura del processo edilizio. Il tema riguarda il rafforzamento della sua capacità descrittiva e regolativa nei passaggi che collegano una fase all'altra, nella continuità degli output informativi e nella verificabilità progressiva del processo. In questa direzione, l'aggiornamento della norma si misura con una più precisa definizione della logica che la sostiene. In questo equilibrio tra permanenza della struttura e adeguamento dei criteri interni, la proposta mantiene rigore, leggibilità e utilità.

Su questo punto si collocano anche le necessarie cautele. I principi qui delineati definiscono una cornice di orientamento e non una riscrittura integrale della UNI 10838. La loro funzione è chiarire il criterio secondo cui la norma potrebbe essere aggiornata, preservandone la chiarezza strutturale e rafforzandone la capacità di governare un processo più continuo e più informato. La ricerca offre basi più solide soprattutto in rapporto a progettazione, produzione e costruzione, mentre la gestione, pur risultando pienamente coerente con il modello complessivo della tesi, occupa ancora una posizione più avanzata sul piano teorico rispetto a quello sperimentale. Per questa ragione, l'integrazione proposta richiede un principio di proporzionalità: una precisione sufficiente a incidere sulla forma della norma e una misura adeguata a evitare un appesantimento del suo impianto. Entro questo perimetro acquistano coerenza le indicazioni operative del paragrafo successivo.

6.5.2 INDICAZIONI PER UN AGGIORNAMENTO DELLA UNI 10838

Le indicazioni che seguono assumono la UNI 10838 come riferimento ordinatore e intervengono sui punti in cui la ricerca ha mostrato una maggiore esigenza di integrazione. Il criterio resta interno alla logica della norma: chiarire che cosa ciascuna fase produce, quali contenuti trasferisce alla successiva e quali informazioni devono mantenere continuità lungo il processo. L'aggiornamento proposto riguarda una più precisa definizione degli output, dei passaggi e delle responsabilità che collegano progettazione, produzione, costruzione e, in prospettiva, gestione.

- **Progettazione:** la norma dovrebbe esplicitare che gli output della fase comprendono, accanto agli elaborati tecnici, anche una base informativa strutturata relativa a esigenze d'uso, vincoli, criteri di scelta, verifiche svolte, revisioni intervenute e modalità di comunicazione del progetto. Questa integrazione avrebbe due effetti. Da un lato, renderebbe più leggibile il rapporto tra quadro conoscitivo e decisione progettuale; dall'altro, permetterebbe di trasferire alla fase successiva contenuti già ordinati e verificabili. Entro questa prospettiva, la progettazione dovrebbe comprendere in modo più chiaro la registrazione delle revisioni, la documentazione delle verifiche intermedie e l'impiego di strumenti digitali di simulazione e comunicazione come parte ordinaria del processo di definizione e controllo del progetto.

- **Produzione:** l'aggiornamento dovrebbe concentrarsi sul rapporto tra progetto e componente. La norma dovrebbe chiarire che questa fase comprende la traduzione del contenuto progettuale in specifiche operative, dati tecnici, documentazione dei materiali, istruzioni di fabbri-

cazione e registrazione delle eventuali modifiche introdotte in sede produttiva. In questo modo, la produzione verrebbe definita con maggiore precisione come fase di consolidamento dell'output informativo del progetto. La norma potrebbe quindi esplicitare che il passaggio tra progettazione e produzione richiede la trasmissione ordinata di requisiti, prestazioni attese, caratteristiche dei componenti e criteri di controllo, così da garantire coerenza tra ciò che è stato definito nel progetto e ciò che viene reso disponibile alla costruzione.

- **Costruzione**: la norma dovrebbe attribuire maggiore rilievo alla registrazione delle modifiche esecutive e all'aggiornamento della documentazione dell'opera. La ricerca ha mostrato che il cantiere produce informazioni decisive: adattamenti, verifiche operative, conferme, scostamenti e correzioni che incidono direttamente sulla consistenza finale del costruito. Un'integrazione della UNI 10838 dovrebbe quindi chiarire che l'output della costruzione comprende anche la restituzione ordinata di tali passaggi, la registrazione delle varianti intervenute e la loro integrazione nella documentazione conclusiva dell'opera. In questa stessa direzione, la fase costruttiva dovrebbe comprendere l'uso di strumenti digitali per il coordinamento operativo, per il controllo dei passaggi esecutivi e per la tracciabilità delle modifiche introdotte nel corso dei lavori.

- **Gestione**: la proposta richiede una formulazione più misurata, ma la direzione appare già definita. La norma potrebbe chiarire che la gestione comprende la permanenza e l'aggiornabilità della memoria tecnica costruita nelle fasi precedenti. Questo significa attribuire valore normativo alla disponibilità delle informazioni

utili all'esercizio, alla manutenzione, al monitoraggio e alla registrazione degli interventi successivi. Una simile integrazione non richiede, in questa sede, la definizione di un sistema compiuto di gestione predittiva. Richiede però che la norma riconosca la continuità tra costruzione e uso dell'opera, chiarendo che la documentazione prodotta lungo il processo mantiene utilità operativa anche nella fase successiva alla consegna.

Nel loro insieme, queste indicazioni mantengono la struttura originaria della UNI 10838 e ne orientano l'evoluzione verso una forma più attenta alla qualità dei passaggi, degli output informativi e dei trasferimenti tra le fasi. La proposta conserva quindi la chiarezza dell'impianto di partenza e, allo stesso tempo, ne rafforza la capacità di governare un processo più continuo, più verificabile e più coerente con le condizioni introdotte dalla transizione digitale.

6.6 SCALABILITÀ, FLESSIBILITÀ E SVILUPPO DEL PROCESSO

Uno degli esiti più solidi della ricerca riguarda la possibilità di leggere il metodo sviluppato come una struttura estendibile, capace di operare in condizioni differenti mantenendo la propria coerenza interna. La tesi costruisce infatti un processo che collega raccolta dei dati, interpretazione delle informazioni, restituzione progettuale, comunicazione del progetto, produzione digitale e supporto alla costruzione entro una stessa logica operativa. Da questa struttura derivano sia la flessibilità del metodo sia la scalabilità del processo.

Sistema processuale.
La flessibilità del metodo deriva da una sequenza di passaggi riconfigurabili in funzione del caso, della scala dell'intervento e della densità delle informazioni disponibili.
La raccolta dei dati, la loro organizzazione, l'interpretazione dei contenuti, la restituzione progettuale e la verifica attraverso strumenti di comunicazione costituiscono un impianto stabile, capace però di assumere configurazioni differenti. Questa proprietà consente di applicare il metodo a interventi circoscritti, come ristrutturazioni, riconfigurazioni distributive e trasformazioni di spazi esistenti, e di estenderlo a contesti più complessi, nei quali crescono il numero degli attori, la varietà delle esigenze e il livello di coordinamento richiesto. La flessibilità del sistema si misura anche nel grado di definizione del processo, poiché la stessa struttura può sostenere quadri informativi essenziali oppure assetti più densi, con livelli differenti di verifica, interpretazione e restituzione. Su questa base, il progetto può svilupparsi attraverso relazioni spaziali, distribuzioni funzionali e modalità di comunicazione differenti, mantenendo ordinato il rapporto tra dati, decisione e controllo. La trasferibilità del metodo dipende da questo equilibrio tra stabilità dell'impianto e variabilità delle confi-

gurazioni che esso può assumere.

Processo operativo.
La ricerca ha mostrato anche che il processo costruito nella tesi possiede una concreta possibilità di scalabilità, poiché la continuità tra progettazione, produzione e costruzione consente di estendere il metodo oltre la dimensione sperimentale iniziale e di applicarlo entro filiere operative più ampie. Configurazione parametrica, modellazione informativa, documentazione dei componenti, controllo dei passaggi operativi e supporto digitale al montaggio entrano qui in una relazione processuale leggibile, capace di operare anche in condizioni più dense sul piano tecnico e organizzativo. Questa continuità rende possibile l'aumento della scala del processo, l'intensificazione del coordinamento e l'estensione dei passaggi operativi mantenendo coerenza interna. La scalabilità riguarda quindi insieme la dimensione del processo e la sua capacità di conservare ordine al crescere della complessità. In questa prospettiva, il metodo può sostenere sviluppi ulteriori verso casi più articolati, reti informative più ampie e una continuità più estesa tra le fasi del processo edilizio.

Sviluppo del processo.
Questa duplice proprietà, flessibilità del sistema e scalabilità del processo, apre una linea di sviluppo ulteriore. Il metodo elaborato nella tesi può accogliere livelli più avanzati di integrazione, rafforzare il coordinamento tra i passaggi, stabilizzare gli output informativi ed estendere i protocolli di verifica. Il suo valore risiede nella possibilità di mantenere chiara la struttura del processo anche al crescere della complessità. La qualità più rilevante del lavoro sta in questo equilibrio: una struttura sufficientemente stabile da poter essere trasferita, sufficientemente flessibile da poter essere sviluppata.

6.7 CONSIDERAZIONI FINALI

La ricerca ha assunto il processo edilizio come campo di osservazione e come struttura da ripensare. Entro questa scelta, il lavoro ha chiarito come la transizione digitale incida sul rapporto tra norma, progetto, produzione e costruzione, modificando il peso delle informazioni, la qualità dei passaggi e le condizioni di controllo dell'opera lungo il suo sviluppo. L'esito più rilevante consiste nella definizione di un metodo che mette in relazione raccolta dei dati, interpretazione delle informazioni, restituzione progettuale, comunicazione del progetto, produzione digitale e supporto alla costruzione entro una stessa logica processuale. In questo quadro, il digitale acquista rilievo quando rafforza la continuità tra conoscenza, decisione, attuazione e verifica, e quando rende più leggibile il rapporto tra le fasi della filiera. La ricerca ha mostrato anche che la qualità del processo dipende in misura crescente dalla qualità delle informazioni che lo attraversano, dalla loro organizzazione, dalla loro trasmissione e dalla loro capacità di sostenere i passaggi successivi. Il dato assume così una funzione strutturale e contribuisce a ridefinire il processo edilizio come sistema più continuo, più controllabile e più aperto alla verifica.

Entro questa cornice si colloca il significato della proposta conclusiva relativa alla UNI 10838. Il punto riguarda la possibilità di rafforzare la norma di processo attribuendo maggiore rilievo ai passaggi tra le fasi, agli output informativi, alla tracciabilità, alla verificabilità progressiva e alla qualità dei raccordi tra soggetti, contenuti e responsabilità. La tesi colloca qui uno dei propri contributi più consistenti, perché mostra che il rinnovamento del costruire dipende anche dalla capacità di governare in modo più consapevole la continuità tra norma, dati, progetto, produzione e costruzione. Restano aperti sviluppi ulteriori, soprattutto in relazione alla

gestione dell'opera, al monitoraggio in esercizio, alla manutenzione informata e alla verifica del metodo entro casi più complessi. Queste aperture precisano la portata della ricerca e ne chiariscono il perimetro. Il lavoro conclude una fase di elaborazione teorica, metodologica e sperimentale e lascia in eredità una struttura sufficientemente chiara da poter essere sviluppata oltre i casi affrontati, entro una visione del processo edilizio più continua, più leggibile e più controllabile.

BIBLIOGRAFIA

PARTE 2_ NORMATIVA

2.0 – Evoluzione storica della normativa italiana

• Argan, G. C. (1977). Progetto e destino. Milano: Il Saggiatore.
• Attenni, M., & Rossi, R. (2022). HBIM e processo di conoscenza. Roma: Gangemi.
• Benevolo, L. (1993). La fine della città. Roma-Bari: Laterza.
• Chaillou, S. (2021). Le BIM est mort, Vive le BIM!. Paris: Eyrolles.
• De Carlo, G. (2013). Architettura e partecipazione. Macerata: Quodlibet.
• Docci, M. (2017). Saper leggere l'architettura. Roma-Bari: Laterza.
• Gregotti, V. (2004). L'architettura del realismo critico. Torino: Einaudi.
• Maldonado, T. (1971). La speranza progettuale. Torino: Einaudi.
• Venturi, R. (1966). Complexity and Contradiction in Architecture. New York: Museum of Modern Art.
• Zevi, B. (1978). Saper vedere l'architettura. Torino: Einaudi.

2.1 Limiti nella normativa italiana

• Argan, G. C. (1977). Progetto e destino. Milano: Il Saggiatore.
• Benevolo, L. (1993). La fine della città. Bari: Laterza.
• Ferlenga, A. (2023). L'architettura. La differenza italiana. Roma: Donzelli.
• Gregotti, V. (2004). L'architettura del realismo critico. Roma-Bari: Laterza.
• Venturi, R. (1966). Complexity and Contradiction in Architecture. New York: MoMA.
• Zevi, B. (1978). Saper vedere l'architettura. Torino: Einaudi.

2.1.2 Contesto e criticità

• Argan, G. C. (1977). Progetto e destino. Il Saggiatore.
• Arnstein, S. R. (1969). A Ladder of Citizen Participation. Journal of the American Institute of Planners.
• Benevolo, L. (1993). La fine della città. Laterza.
• Chaillou, S. (2021). Le BIM est mort. Eyrolles.
• Crespi Reghizzi, O. (2017). Il diritto dell'edilizia. Giuffrè.
• De Carlo, G. (2013). Architettura e partecipazione. Quodlibet.
• Docci, M. (2017). Saper leggere l'architettura. Laterza.

• Gregotti, V. (2004). L'architettura del realismo critico. Laterza.
• Marchesi, G. (2004). Gestione e manutenzione edilizia. FrancoAngeli.
• UNI 10838. (1999). Processo edilizio – Terminologia e classificazione.
• Zevi, B. (1978). Saper vedere l'architettura. Einaudi.

2.1.3 Limiti tecnico-normativi evidenziati

• Arnstein, S. R. (1969). "A Ladder of Citizen Participation". Journal of the American Institute of Planners.
• Attenni, L., & Rossi, G. (2019). Progettare la qualità ambientale interna. Milano: Hoepli.
• Attenni, M., & Rossi, R. (2022). HBIM e processo di conoscenza. Franco-Angeli.
• Benevolo, L. (1993). La fine della città. Laterza.
• Crespi Reghizzi, O. (2017). Il diritto dell'edilizia. Giuffrè.
• D.Lgs. 36/2023. Codice dei Contratti Pubblici.
• D.Lgs. 81/2008.
• D.Lgs. 152/2006. Codice dell'Ambiente.
• D.Lgs. 192/2005 e 311/2006; Direttiva EPBD 2002/91/CE e 2010/31/UE.
• D.M. 17/01/2018. Norme Tecniche per le Costruzioni.
• D.M. 28/02/2017. Linee Guida Classificazione Rischio Sismico.
• D.M. 236/1989. Prescrizioni tecniche per l'accessibilità.
• D.M. 560/2017. Decreto BIM.
• D.P.R. 380/2001. Testo Unico dell'Edilizia.
• DDR. (2024). Deep Decarbonization Report. European Commission.
• De Carlo, G. (2013). Architettura e partecipazione. Quodlibet.
• Direttiva 2010/31/UE (EPBD).
• Direttiva 2018/844/UE.
• Docci, M. (2013). Il progetto edilizio. Torino: UTET.
• Docci, M. (2017). Saper leggere l'architettura. Laterza.
• Eastman, C. et al. (2011). BIM Handbook. Wiley.
• ENEA. (2024). Rapporto Annuale sull'Efficienza Energetica. Roma: ENEA.
• IPCC. (2021). Sixth Assessment Report.
• Itaca. (2021). Linee guida per la certificazione ambientale degli edifici.
• Legge 13/1989. Disposizioni per il superamento delle barriere architet-

toniche.
• Marchesi, F. (2020). La manutenzione degli edifici. Bologna: Maggioli.
• Marchesi, G. (2004). Gestione e manutenzione edilizia. FrancoAngeli.
• Ministero dell'Ambiente. (2018). Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici.
• Norberg-Schulz, C. (1980). Genius Loci. Milano: Electa.
• Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR).
• Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza. Missione 5.
• Rizzo, M. (2021). Prontuario di edilizia. Il Sole 24 Ore.
• Sanoff, H. (2000). Community Participation Methods in Design and Planning. Wiley.
• Spinuzzi, C. (2005). The Methodology of Participatory Design. Technical Communication.
• UNI 10838. (1999). Processo edilizio – Classificazione e terminologia.
• UNI 11300. Prestazioni energetiche degli edifici.
• UNI 11337. (2017). Gestione digitale dei processi informativi.
• UNI 11838. (2022). Gestione dei processi manutentivi lungo il ciclo di vita.
• UNI EN ISO 19650. Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni.
• WHO. (2010). Indoor Air Quality: Selected References. Geneva: World Health Organization.
• WHO. (2018). Guidelines on housing and health. World Health Organization.
• WHO. (2022). Guidelines for Indoor Air Quality. Geneva: WHO Press.
• Zevi, B. (1978). Saper vedere l'architettura. Einaudi.• Itaca. (2021). Linee guida per la certificazione ambientale.
• Marchesi, G. (2004). Gestione e manutenzione edilizia. FrancoAngeli.
• Preiser, W. F. E. (2002). Improving Building Performance. Springer.
• Sanoff, H. (2000). Community Participation Methods in Design and Planning. Wiley.
• Spinuzzi, C. (2005). The Methodology of Participatory Design. Technical Communication.

2.2 Confronto con la normativa europea

• Attenni, M., & Rossi, R. (2022). HBIM e processo di conoscenza. FrancoAngeli.

• Boverket. (2024). BBR – Boverkets Byggregler. BFS 2024:9.
• Crespi Reghizzi, O. (2017). Il diritto dell'edilizia. Giuffrè.
• Danish Building Authority. (2021). Guidelines for the Digital Building Logbook.
• Direktoratet for byggkvalitet. (2017). TEK17 – Byggteknisk Forskrift.
• Eastman, C. et al. (2011). BIM Handbook. Wiley.
• ENEA. (2023). Relazione Annuale sull'Efficienza Energetica.
• ENEA. (2024). RAEE.
• European Commission. (2019). European Green Deal.
• European Commission. (2021). Level(s).
• European Commission. (2023). EPBD Recast Directive.
• European Commission. (2024). Deep Decarbonization Report.
• European Union. (2014). Directive 2014/24/EU on Public Procurement.
• Folkhälsomyndigheten. (2019). Indoor Environment and Public Health.
• Lowe, R. (2015). The Indoor Environment Handbook. Routledge.
• Ministero dell'Ambiente. (2022). Decreto CAM Edilizia.
• Ministry of the Environment. (2017). Building Code and Maintenance Manual Guidelines.
• Ministry of the Environment. (2020). Digital Twin Guidelines.
• Ministry of the Environment Finland. (2020). Circularity Guidelines.
• Ministry of the Environment Finland. (2020). Participation Guidelines.
• Ministry of the Environment Finland. (2020). Post-Occupancy Guidelines.
• Ministry of the Environment Finland. (2020). Resilience Guidelines.
• Realdania. (2022). Bylivslaboratoriet: Methods and Impact.
• Realdania. (2024). KlimadataRapport.
• Regione Lazio. (2005). Fascicolo del Fabbricato.
• Sanoff, H. (2000). Community Participation Methods in Design and Planning. Wiley.
• Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen. (2018). BR18 Building Regulations.
• United Nations. (2006). Convention on the Rights of Persons with Disabilities.
• WHO. (2010). WHO Guidelines.
• White Arkitekter. (2019). Nya Hovås Project Report.
• Zevi, B. (1978). Saper vedere l'architettura. Einaudi.

2.3 Prospettive di aggiornamento della normativa italiana

• Boverket. (2024). BBR – Boverkets Byggregler.
• Direktoratet for byggkvalitet. (2017). TEK17 – Byggteknisk Forskrift.
• European Commission. (2021). Level(s).
• European Commission. (2023). EPBD Recast Directive.
• Ministry of the Environment Finland. (2020). Participation Guidelines.
• Sanoff, H. (2000). Community Participation Methods in Design and Planning. Wiley.
• Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen. (2018). BR18 Building Regulations.
• UNI 11337. Gestione digitale del processo edilizio.
• WHO. (2010). Indoor Air Quality Guidelines.

2.4 Analisi e limiti del processo edilizio

• Attenni, M., & Rossi, R. (2022). HBIM e processo di conoscenza. Franco-Angeli.
• Boverket. (2024). Boverkets Byggregler.
• Eastman, C. et al. (2011). BIM Handbook. Wiley.
• European Commission. (2019). European Green Deal.
• European Commission. (2021). Level(s).
• Lawson, B. (2006). How Designers Think. Architectural Press.
• Marchesi, G. (2004). Gestione e manutenzione edilizia. FrancoAngeli.
• Ministry of the Environment Finland. (2020). Participation Guidelines.
• Sanoff, H. (2000). Community Participation Methods in Design and Planning. Wiley.
• Schön, D. A. (1983). The Reflective Practitioner. Basic Books.
• Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen. (2018). BR18 Building Regulations.
• UNI 10838. Processo Edilizio.
• WHO. (2010). Indoor Air Quality Guidelines.

2.5 Prospettive di aggiornamento del processo edilizio

• Amministrazione Scarpellini. (2023). Gestione condominiale innovativa a Cascina Merlata.
• ANAC. (2023). Linee guida per la validazione dei progetti.
• Attenni, M., & Rossi, M. (2022). HBIM e processo di conoscenza. Gangemi.

• Benevolo, L. (2001). Il tracollo dell'urbanistica italiana. Laterza.
• BTicino. (2022). Le Albere – Referenza impiantistica.
• De Carlo, G. (1972). Architettura della partecipazione. Bari: Dedalo.
• De Carlo, G. (1972). L'architettura della partecipazione. Marsilio.
• D.Lgs. 36/2023. Codice dei contratti pubblici.
• D.Lgs. 81/2008. Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro.
• DM 17 giugno 2016. Contenuti minimi dei livelli di progettazione.
• Docci, M., & Chiavoni, E. (2017). Saper leggere l'architettura. Laterza.
• D.P.R. 554/1999; D.Lgs. 36/2023. Codice dei contratti pubblici.
• Gregotti, V. (1966). Il territorio dell'architettura. Feltrinelli.
• Irace, F. (1990). L'INA-Casa e l'idea di città. Electa.
• Maldonado, T. (1971). La speranza progettuale. Einaudi.
• RIBA (UK), HOAI (Germania), Loi MOP (Francia).
• Rizzo, M. (2021). Prontuario di edilizia. Il Sole 24 Ore.
• Semper, G. (1860). Der Stil.
• UNI 10838. (1999). Processo edilizio – Fasi e condizioni del processo.
• UNI 11337. Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni.
• Viollet-le-Duc, E.-E. (1872). Entretiens sur l'architecture.

2.6 Introduzione degli strumenti digitali nella normativa italiana

• BuildingSMART. (2020). IFC for Interoperability.
• Carpo, M. (2011). The Alphabet and the Algorithm. Cambridge, MA: MIT Press.
• D.Lgs. 36/2023. Codice dei contratti pubblici.
• Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2008). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling. Hoboken: Wiley.
• Irace, F. (1990). L'INA-Casa e l'idea di città. Milano: Electa.
• Manovich, L. (2001). The Language of New Media. Cambridge, MA: MIT Press.
• Schumacher, P. (2012). The Autopoiesis of Architecture. Hoboken: Wiley.
• UNI 10838. (1999). Processo edilizio – Fasi e condizioni del processo.
• UNI 11337. Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni.

2.6.1 Limiti operativi e integrazione digitale.

• AEC Innovation Lab. (2021). AI in Construction: Trends and Scenarios.
• Autodesk. (2020). Connected BIM for Project Management.
• Batty, M. (2018). Digital Twins and Smart Cities. Environment and Planning B.
• BuildingSMART. (2020). IFC for Interoperability.
• Carpo, M. (2017). The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence. MIT Press.
• D.Lgs. 36/2023. Codice dei contratti pubblici.
• Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2008). BIM Handbook. Wiley.
• EU BIM Task Group. (2017). Handbook for the Introduction of Building Information Modelling by the European Public Sector.
• Manovich, L. (2001). The Language of New Media. MIT Press.
• Schumacher, P. (2012). The Autopoiesis of Architecture: A New Framework for Architecture. Wiley.
• UNI EN ISO 19650. Gestione dell'informazione nel ciclo di vita di un'opera con BIM.

2.6.2 Limiti attuali del sistema

• Accenture. (2020). Predictive Maintenance in the Construction Industry.
• Autodesk. (2021). The Future of Construction: AR and VR in the Jobsite.
• Batty, M. (2018). Digital twins and smart cities. Environment and Planning B.
• Bolognesi, C. (2022). Smart Building. Tecnologie per l'edificio intelligente. FrancoAngeli.
• Bolognesi, C., & Bianconi, F. (2020). Building Information Modeling e gestione del ciclo di vita dell'edificio. FrancoAngeli.
• Carpo, M. (2011). The Alphabet and the Algorithm. MIT Press.
• Dalla Costa, M. (2021). Digitalizzazione e formazione nell'edilizia: sfide e prospettive. Maggioli.
• Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2008). BIM Handbook. Wiley.
• Eastman, C. et al. (2018). BIM Handbook. Wiley.
• ENEA & CNR. (2023). Digital Twin e transizione energetica urbana.

• Morozov, E. (2013). To Save Everything, Click Here. PublicAffairs.
• UNI 11337. Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni.

2.6.3 Scenari futuri

• ANAC. (2023). Rapporto annuale sull'attuazione del Codice dei Contratti Pubblici. Roma: Autorità Nazionale Anticorruzione.
• Batty, M. (2013). The New Science of Cities. MIT Press.
• BuildingSMART Italia. (2022). Interoperabilità e gestione dei dati nel ciclo edilizio. Milano: BSI Press.
• Carpo, M. (2011). The Alphabet and the Algorithm. MIT Press.
• Carpo, M. (2017). The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence. MIT Press.
• CNAPPC. (2021). Piano Nazionale per la Transizione Digitale del progetto e dell'architettura. Roma.
• CNAPPC. (2022). Linee guida per l'aggiornamento professionale digitale. Roma.
• DCLG – UK Department for Communities and Local Government. (2012). Industrial Strategy: Construction 2025.
• Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling. Wiley.
• EU BIM Task Group. (2017). Handbook for the Introduction of Building Information Modelling by the European Public Sector. European Commission.
• Latour, B. (2005). Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network-Theory. Oxford University Press.
• Manovich, L. (2001). The Language of New Media. MIT Press.
• Tzortzopoulos, P., & Cooper, R. (2007). Design Management: Managing Design Processes in the Construction Industry. Wiley-Blackwell.
• UNI 11337. (2017). Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni. UNI.
• Venturi, R., Scott Brown, D., & Izenour, S. (1972). Learning from Las Vegas. MIT Press.

2.6.4 Verso un nuovo approccio del costruire

• Carpo, M. (2011). The Alphabet and the Algorithm. MIT Press.
• Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). BIM Handbook. Wiley.
• Lévy, P. (1997). L'intelligenza collettiva. Per un'antropologia del cyberspazio. Feltrinelli.
• Manovich, L. (2001). The Language of New Media. MIT Press.
• UNI 10838. (1999). Processo edilizio – Fasi e condizioni del processo. UNI.

2.7 Riorganizzare le fasi del processo edilizio

• Ambrosi, A. (2022). Tesi di laurea magistrale.
• Brandolese, A., Pozzetti, A., & Sianesi, A. (2010). Gestione della produzione industriale. Hoepli.
• Carrara, G. (a cura di). (2020). Lezioni di tecnologia dell'architettura. Maggioli.
• Dumas, M. et al. (2018). Fundamentals of Business Process Management. Springer.
• Garg, S. et al. (2024). Dynamic Management of AEC Workflows.
• Lavin, S. (2018). Architecture Itself and Other Postmodern Myths. MIT Press.
• Meadows, D. (2008). Thinking in Systems: A Primer. Chelsea Green.
• Pidd, M. (2003). Tools for Thinking. Wiley.
• Pidd, M. (2004). Systems Modelling: Theory and Practice. Wiley.
• Sianesi, A. (2018). La gestione del sistema di produzione. Egea.

PARTE 3_ PROGETTAZIONE

3.1 Digitalizzazione nella progettazione architettonica

• Chaillou, S. (2022). Artificial Intelligence and Architecture: From Research to Practice. Birkhäuser.
• Harari, N. Y. (2018). Homo Deus: Breve storia del futuro. Bompiani.
• Hoar, C., Atkin, B., & King, K. (2017). Artificial Intelligence: What it Means for the Built Environment. Royal Institution of Chartered Surveyors.

• Lawson, B. (2005). How Designers Think: The Design Process Demystified (4a ed.). Architectural Press.
• Matsuda, K. (2016). Hyper-Reality [Lecture/Film].
• Schön, D. (1983). The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action. Basic Books.
• Venturi, R. (2002). Complessità e contraddizioni nell'architettura (6a ed.). Dedalo.

3.2 Strumenti e approcci alla progettazione

• Alexander, C. (1964). Notes on the Synthesis of Form. Harvard University Press.
• Batty, M. (2013). The New Science of Cities. MIT Press.
• Buchanan, R. (1992). "Wicked Problems in Design Thinking". Design Issues, 8(2).
• Capozzi, M., & Mies, G. (2022). "Cognitive Infrastructures and the Governance of Urban Complexity". In CriticaPratica_Call2.
• Cross, N. (2007). Designerly Ways of Knowing. Springer.
• Drain, B., & Sanders, E. B.-N. (2019). Participatory Design Collaboration System Model.
• Ehn, P. (1993). Scandinavian design: On participation and skill. In D. Schuler, & A. Namioka (Eds.), Participatory Design: Principles and Practices.
• Frazer, J. (1995). An Evolutionary Architecture. Architectural Association.
• Fung, A. (2006). "Varieties of Participation in Complex Governance". Public Administration Review.
• Gausa, M. (2003). The Metapolis Dictionary of Advanced Architecture. Actar.
• Greenbaum, J., & Loi, D. (2012). Participation, the camel and the elephant of design: An introduction. CoDesign.
• Gregotti, V. (1966). Il territorio dell'architettura. Feltrinelli.
• Kitchin, R. (2014). The Data Revolution: Big Data, Open Data, Data Infrastructures and Their Consequences. Sage.
• Lawson, B. (2006). How Designers Think: The Design Process Demystified. Architectural Press.
• Leach, N. (2009). "Digital Morphogenesis". Architectural Design, 79(1).
• Maldonado, T. (1970). La speranza progettuale. Einaudi.

• Manzini, E. (1990). Artefatti. Verso una nuova ecologia dell'ambiente artificiale. Domus Academy / Edizioni di Comunità.
• Manzini, E. (2015). Design, When Everybody Designs. MIT Press.
• Mechelen, M. van, et al. (2019). A framework for characterizing participatory design approaches in health research.
• Menges, A. (2012). "Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design". Architectural Design, 82(2).
• Morozov, E. (2013). To Save Everything, Click Here: The Folly of Technological Solutionism. PublicAffairs.
• Nabatchi, T. (2012). A Manager's Guide to Evaluating Citizen Participation. IBM Center.
• Pavan, A., Cassandro, J., & Di Martino, B. (2025). BIM e AI. Strategie per la progettazione computazionale. McGraw-Hill.
• Ratti, C., & Claudel, M. (2016). The City of Tomorrow: Sensors, Networks, Hackers, and the Future of Urban Life. Yale University Press.
• Rossi, M. L. (2019). "Algoritmi generativi per i modelli del patrimonio culturale". In Patrimonio Digitale e Modelli Generativi.
• Rowe, P. G. (1987). Design Thinking. MIT Press.
• Sanders, E. B.-N., & Stappers, P. J. (2008). Co-creation and the new landscapes of design. CoDesign.
• Scherhaufer, P. (2021). Revisiting Participation in Planning.
• Schön, D. A. (1983). The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action. Basic Books.
• Simon, H. A. (1969). The Sciences of the Artificial. MIT Press.
• Tedeschi, A. (2014). AAD – Algorithms-Aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper. Le Penseur.
• Tersigni, E., & Leone, M. F. (2019). Progetto resiliente e adattamento climatico. FrancoAngeli.

3.2.1 Modelli e partecipazione nella progettazione

• Arnstein, S. R. (1969). A Ladder of Citizen Participation. Journal of the American Institute of Planners, 35(4), 216–224.
• Brandt, E. (2006). Designing Exploratory Design Games: A Framework for Participation in Participatory Design. Proceedings of the Participatory Design Conference.

• De Carlo, G. (1972). Architettura della partecipazione. Bari: Laterza.
• Ehn, P. (1993). Scandinavian Design: On Participation and Skill. In D. Schuler & A. Namioka (Eds.), Participatory Design: Principles and Practices. Erlbaum.
• Manzini, E. (2015). Design, When Everybody Designs. Cambridge, MA: MIT Press.
• Nabatchi, T. (2012). A Manager's Guide to Evaluating Citizen Participation. IBM Center for The Business of Government.
• Sanders, E. B.-N., & Stappers, P. J. (2008). Co-creation and the new landscapes of design. CoDesign, 4(1), 5–18.
• Sanoff, H. (2000). Community Participation Methods in Design and Planning. New York: Wiley.
• Venturi, R. (2002). Complessità e contraddizioni nell'architettura. Roma: Dedalo

3.2.2 Limiti strutturali dei modelli partecipativi

• Arnstein, S. R. (1969). "A Ladder of Citizen Participation". Journal of the American Institute of Planners, 35(4).
• Brandt, E. (2006). Designing Exploratory Design Games. PhD Thesis, Danmarks Designskole.
• Fung, A. (2006). Varieties of Participation in Complex Governance. Public Administration Review, 66, 66–75.
• Manzini, E. (2015). Design, When Everybody Designs. MIT Press.
• Sanoff, H. (2000). Community Participation Methods in Design and Planning. Wiley.
• Schön, D. A. (1983). The Reflective Practitioner. Basic Books.
• Star, S. L. (1999). The Ethnography of Infrastructure. American Behavioral Scientist, 43(3), 377–391.

3.2.3 Strumenti digitali nella progettazione partecipata

• Arnstein, S. R. (1969). "A Ladder of Citizen Participation". Journal of the American Institute of Planners, 35(4).
• De Carlo, G. (1972). Architettura della partecipazione. Laterza.
• Manzini, E. (2015). Design, When Everybody Designs. MIT Press.
• Sanders, E. B.-N., & Stappers, P. J. (2008). "Co-creation and the new landscapes of design". CoDesign, 4(1).

• Sanoff, H. (2000). Community Participation Methods in Design and Planning. Wiley.

3.3 Intelligenza artificiale in architettura e prospettive di innovazione

• Bernstein, P. (2024). Artificial Intelligence, agency and architecture.
• Chaillou, S. (2022). Artificial Intelligence and Architecture: From Research to Practice. Birkhäuser.
• Leach, N. (2022). Architecture in the Age of Artificial Intelligence. Bloomsbury.
• Royal Institute of British Architects. (2025). RIBA AI Report 2025.
• Vishnoi, N. (2023). How Machines Learn to Write.

3.3.1 Intelligenza artificiale e processo partecipativo

• Ehn, P. (1993). Scandinavian Design: On Participation and Skill. In Schuler & Namioka (Eds.).
• Manzini, E. (2015). Design, When Everybody Designs. MIT Press.
• Nabatchi, T. (2012). A Manager's Guide to Evaluating Citizen Participation. IBM Center.
• Sanders, E. B.-N., & Stappers, P. J. (2008). Co-creation and the new landscapes of design. CoDesign, 4(1).

3.3.2 Organizzare il processo progettuale come i nfrastruttura di conoscenza

• Cross, N. (2007). Designerly Ways of Knowing. Springer.
• Lawson, B. (2006). How Designers Think. Architectural Press.
• Manzini, E. (2015). Design, When Everybody Designs. MIT Press.
• Sanders, E. B.-N., & Stappers, P. J. (2008). CoDesign, 4(1).
• Schön, D. A. (1983). The Reflective Practitioner. Basic Books

3.3.3 Sistemi generativi e partecipazione come struttura decisionale nel processo progettuale

• Brandt, E., & Sanders, E. (2013). A Framework for Organizing the Tools and Techniques of Participatory Design.
• Chaillou, S. (2022). Artificial Intelligence and Architecture. From Research to Practice. Basel: Birkhäuser.
• Lawson, B. (2006). How Designers Think. London–New York: Routledge.

• Leach, N. (2021). Architecture in the Age of Artificial Intelligence. London: Bloomsbury.
• Oxman, R., & Oxman, R. (2014). Theories of the Digital in Architecture. London–New York: Routledge.
• Pallasmaa, J. (2012). The Eyes of the Skin. Chichester: Wiley.
• Pask, G. (1969). The Architectural Relevance of Cybernetics. Architectural Design, 39.
• Rittel, H., & Webber, M. (1973). Dilemmas in a General Theory of Planning. Policy Sciences, 4(2), 155–169.
• Schön, D. (1983). The Reflective Practitioner. New York: Basic Books.
• Till, J. (2009). Architecture Depends. Cambridge (MA): MIT Press.
• Udoewa, V. (2023). An Introduction to Radical Participatory Design – Decolonising Participatory Design Processes.

3.4 Nuovo ruolo del progettista

• Chaillou, S. (2022). Artificial Intelligence and Architecture. Birkhäuser.
• Dakam, M. (2020). Participatory Architecture and the Digital Turn. Dakam Publishing.
• De Carlo, G. (1972). Architettura della partecipazione. Laterza.
• Drucker, P. (1999). Knowledge Worker Productivity. Harvard Business Review.
• Friedman, Y. (1975). Towards a Scientific Architecture. MIT Press.
• Gropius, W. (1961). Scope of Total Architecture. Harper & Row.
• Ingersoll, R. (2006). Sprawltown: Looking for the City on Its Edges. Princeton Architectural Press.
• Lawson, B. (2005). How Designers Think. Architectural Press.
• Matsuda, K. (2016). Hyper-Reality. Film/Lecture.
• Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2017). DM 560/2017.
• Ratti, C., & Claudel, M. (2016). The City of Tomorrow. Yale University Press.
• Sanoff, H. (2000). Community Participation Methods in Design and Planning. Wiley.
• Schön, D. A. (1983). The Reflective Practitioner. Basic Books.
• Sennett, R. (2012). Together: The Rituals, Pleasures and Politics of Cooperation. Yale University Press.

• Tedeschi, A. (2014). Algorithms-Aided Design. Le Penseur.
• Venturi, R. (2002). Complessità e contraddizioni nell'architettura. Dedalo.

3.5 Variabile tempo nel progetto

• Alberti, L. B. (1452). De Re Aedificatoria. Firenze. I.
• Bachelard, G. (1938). L'intuizione dell'istante. Milano: Cortina. 109.
• Bateson, G. (2000). Verso un'ecologia della mente. Milano: Adelphi. 98, 109.
• Bauman, Z. (2000). Modernità liquida. Roma-Bari: Laterza. 11.
• Campillo, A. (2020). "Aión, Chrónos y Kairós: La concepción del tiempo en la Grecia Clásica." In La(s) otra(s) historia(s), n. 3, Departamento de Historia, UNED – Bergara. 16, 23.
• Chaillou, S. (2019). Computer Generated Residential Building Layouts. Harvard University Graduate School of Design. 47, 52, 62.
• Frommel, C. L. (2009). L'architettura del Rinascimento italiano. Milano: Skira. 91, 183, 211.
• García, H., & Miralles, F. (2017). Ikigai: Il metodo giapponese. Milano: Pickwick. 42.
• Giedion, S. (1941). Space, Time and Architecture. Cambridge, MA: Harvard University Press. 36, 151.
• Gropius, W. (1965). The New Architecture and the Bauhaus. Cambridge, MA: MIT Press. 37.
• Heidegger, M. (1927). Essere e Tempo. Trad. it. 2005. Milano: Longanesi. 185.
• Kurokawa, K. (1977). Metabolism in Architecture. London: Studio Vista. 52.
• Latour, B. (2005). Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network-Theory. Oxford: Oxford University Press. 199.
• Lawson, B. (2005). How Designers Think: The Design Process Demystified. Oxford: Elsevier. 112.
• Leach, N. (2022). Architecture in the Age of Artificial Intelligence. Londra: Bloomsbury Visual Arts. 24, 129, 173.
• Le Corbusier. (1923). Vers une Architecture.
• Mies van der Rohe, L. (1930). "Less Is More." In Bauen und Wohnen. Ber-

lino.
• Mogi, K. (2017). Il piccolo libro dell'Ikigai. Milano: Einaudi. 29, 44.
• Nelson, H. G., & Stolterman, E. (2012). The Design Way. Cambridge, MA: MIT Press. 41.
• Oxman, N. (2010). "Material-based design computation." MIT Design Lab Papers, 45(3), 57–74. 59.
• Palladio, A. (1570). I Quattro Libri dell'Architettura. Venezia. Vol. I.
• Pallasmaa, J. (2012). The Eyes of the Skin: Architecture and the Senses. Chichester: Wiley. 45.
• Ricoeur, P. (1983). Temps et récit. Paris: Seuil.
• Rosa, H. (2015). Accelerazione e alienazione. Torino: Einaudi. 27, 36, 37, 39.
• Rudokas, J. (2023). "Temporalità e progetto. Il tempo come struttura del fare." Logos, 109(3), 63–70. 66.
• Saggio, A. (2001). La piramide e il labirinto. Roma: Officina. 47.
• Schön, D. A. (1983). The Reflective Practitioner. New York: Basic Books. 49.
• Susskind, R., & Susskind, D. (2022). The Future of the Professions. Oxford: Oxford University Press. 146.
• Tschumi, B. (1987). The Manhattan Transcripts. London: Academy Editions.
• Vitruvio Pollione, M. De Architectura. I sec. a.C. I, I.
• Wittkower, R. (1952). Architectural Principles in the Age of Humanism. London: Academy Editions. 13, 44, 63.
• Wright, F. L. (1954). The Natural House. New York: Horizon Press. 61.
• Zevi, B. (1948). Saper vedere l'architettura. Torino: Einaudi. 33.

3.5.1 Tempo kairologico nella progettazione architettonica: esperienze e metodi a confronto

• Agamben, G. (2000). Il tempo che resta. Un commento alla Lettera ai Romani. Torino: Bollati Boringhieri.
• Allen, S. (1999). Practice: Architecture, Technique and Representation. New York: Routledge.
• Bachelard, G. (1938). L'intuizione dell'istante. Milano: Cortina. 109.
• Beck, H. (2007). "Glenn Murcutt and the Australian Landscape." Archi-

tectural Review Australia, (102).

• Botond, B. (2012). Kengo Kuma: Complete Works. Thames & Hudson.

• Casati, R. (2010). Tempo e architettura. Milano: Mondadori.

• Curtis, W. J. R. (1988). Balkrishna Doshi: An Architecture for India. New York: Rizzoli.

• Dal Co, F. (1984). Carlo Scarpa: The Architect at Work. New York: Rizzoli International.

• Doshi, B. V. (2016). Architecture for the People (interviews). Vitra Design Museum.

• Doshi, B. V. (2019). Paths Uncharted. Ahmedabad: Vastu-Shilpa Foundation.

• Drew, P. (1999). Glenn Murcutt: Architect. Thames & Hudson. 38, 41.

• ElKadi, G., & Elkerdany, D. (2019). "Slowness, Sacredness and Place: Architecture of Doshi." Architectural Review.

• Evans, R. (1995). The Projective Cast: Architecture and Its Three Geometries. Cambridge, MA: MIT Press.

• Frampton, K. (1980). Modern Architecture: A Critical History. London: Thames & Hudson. 184.

• Frampton, K. (1995). Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture. MIT Press.

• Frampton, K. (2007). Modern Architecture: A Critical History. London: Thames & Hudson. 146, 243.

• Gramazio, F., & Kohler, M. (2013). The Digital Turn in Architecture 1992–2012. Jovis Verlag. 62.

• Hartoonian, G. (2010). Crisis of the Object: The Architecture of Theatricality. New York: Routledge.

• Isozaki, A. (2006). Japan-ness in Architecture. MIT Press.

• Kahn, L. I. (1973). Form and Design. In Louis Kahn: Essential Texts, edited by Robert Twombly. Norton. 34.

• Kandinsky, W. (1926). Punto, linea, superficie. Milano: Adelphi, ed. it. 1996.

• Kuma, K. (2008). Anti-Object: The Dissolution and Disintegration of Architecture. Tokyo: Kajima Institute.

• Lang, J., Desai, M., & Desai, M. (1997). Architecture and Independence: The Search for Identity – India 1880 to 1980. Oxford University Press.

• Levine, N. (1996). The Architecture of Frank Lloyd Wright. Princeton University Press. 55, 68.
• MacKeith, P. (2005). "Zumthor's Design Process: The Presence of the Past." In Peter Zumthor: Works. Phaidon Press.
• McCarter, R. (1997). Frank Lloyd Wright. London: Phaidon Press. 204.
• McCarter, R. (2005). Louis I. Kahn. London: Phaidon. 305.
• Menges, A. (2021). Integrative Computational Design and Construction. Wiley. 38, 44.
• Murphy, R. (1990). Carlo Scarpa and the Castelvecchio. London: Butterworth Architecture.
• Nitschke, G. (1993). From Shinto to Ando: Studies in Architectural Anthropology in Japan. Academy Editions.
• Otto, F., & Menges, A. (2010). Form and Material in Nature and Architecture. Edition Axel Menges.
• Pallasmaa, J. (2009). The Thinking Hand: Existential and Embodied Wisdom in Architecture. Chichester: Wiley.
• Pawley, M. (2009). Peter Zumthor: Buildings and Projects 1985–2013. London: Phaidon Press.
• Ricoeur, P. (1983). Temps et récit. Paris: Éditions du Seuil. 265.
• Rosa, H. (2016). Resonanz: Eine Soziologie der Weltbeziehung. Berlin: Suhrkamp Verlag.
• Rovelli, C. (2017). L'ordine del tempo. Milano: Adelphi. 31.
• Rykwert, J. (2001). The Judicious Eye: Architecture Against the Other Arts. Princeton Architectural Press.
• Schön, D. A. (1983). The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action. New York: Basic Books.
• Siza, Á. (2000). Writings on Architecture. Lisbon: Edicoes Asa. 89.
• Solomon, S. G. (1991). Louis I. Kahn's Trenton Jewish Community Center. MIT Press. 97.
• Tavares, P. (2019). Architectures of the Sea. In Drawing Matter Journal.
• Tschumi, B. (1987). The Manhattan Transcripts. London: Academy Editions. 6, 10.
• Tschumi, B. (1994). Event-Cities. Cambridge, MA: MIT Press. 38.
• Vidler, A. (2008). Histories of the Immediate Present: Inventing Architectural Modernism. Cambridge, MA: MIT Press. 97, 98.

• Weston, R. (2002). Plans, Sections and Elevations: Key Buildings of the Twentieth Century. Laurence King Publishing.
• Wright, F. L. (1943). An Autobiography. New York: Duell, Sloan and Pearce. 223.
• Zumthor, P. (2006). Thinking Architecture (2nd ed.). Basel: Birkhäuser.
• Zumthor, P. (2010). Atmospheres: Architectural Environments – Surrounding Objects. Basel: Birkhäuser.

3.6 Nuovo modello progettuale

• Bhatia, M. (2020–2023). Sperimentazioni generative e ambienti computazionali per il design.
• Chaillou, S. (2022). Artificial Intelligence and Architecture. Birkhäuser.
• Cross, N. (2007). Designerly Ways of Knowing. Basel: Birkhäuser.
• Harari, Y. N. (2017). Homo Deus. Breve storia del futuro. Milano: Bompiani.
• Latour, B. (2005). Reassembling the Social. Oxford University Press.
• Lawson, B. (2006). How Designers Think. Oxford: Architectural Press.
• Schön, D. A. (1983). The Reflective Practitioner. New York: Basic Books.

3.6.1 Progettazione partecipata integrata nel processo decisionale

• Brandt, E., & Sanders, E. (2013). Tools and Techniques in Participatory Design.
• Brunetti, G. L. (2020). L'intelligenza artificiale nella progettazione.
• Chaillou, S. (2022). Artificial Intelligence and Architecture.
• European Commission. (2021). New European Bauhaus.
• Hofmann, S. (2019). Architecture Is Participation.
• JRC. (2020). Citizen Engagement in Urban Development.
• Latour, B. (2005). Reassembling the Social.
• Lawson, B. (2006). How Designers Think.
• Rittel, H., & Webber, M. (1973). Dilemmas in a General Theory of Planning.
• Sanoff, H. (2000). Community Participation Methods in Design and Planning.
• Schön, D. A. (1983). The Reflective Practitioner.

• Spinuzzi, C. (2005). The Methodology of Participatory Design.

3.6.2 Integrazione degli utenti con gli strumenti digitali

• Brunetti, G. L. (2020). L'intelligenza artificiale nella progettazione. Macerata: Quodlibet.
• Leach, N. (2021). Architecture in the Age of Artificial Intelligence. London: Bloomsbury.
• Pallasmaa, J. (2005). The Eyes of the Skin. Architecture and the Senses. London: Wiley.
• Ruotolo, F. (2020). "Big Data e potere decisionale: chi decide davvero?" Techne, Special Series, vol. 2, 45–53.

3.6.3 Nuovo modello progettuale

• Alessandro Cravera. (2022). Chronos and Kairos: time as a quantitative or qualitative strategy. Il Sole 24 Ore, Management form.
• Bonuomo, A., Caruso, M. G., & Crisci, M. I nuovi volti della famiglia italiana: dinamiche recenti e aspetti evolutivi.
• Bonifazi, C. (2013). L'Italia delle migrazioni. Bologna: Il Mulino.
• Bosisio, R., & Ronfani, P. (2015). Le famiglie omogenitoriali. Responsabilità, regole e diritti. Carocci Editore.
• Brandt, E., Binder, T., & Sanders, E. (2013). Routledge international handbook of participatory design. London: Routledge.
• Chaillou, S. (2019). AI & Architecture, towards a new approach. Thesis, Harvard Graduate School of Design.
• Chaillou, S. (2021). L'intelligence artificielle au service de l'architecture. Le Moniteur Édition.
• Chaillou, S. (2023). Artificial intelligence and architecture: from research to practice. Birkhäuser.
• Chaillou, S. ArchiGAN: a Generative Stack for Apartment Building Design. In Architectural intelligence: select papers from the 1st international conference on computational design and robotic fabrication. Springer. 117–127.
• Del Campo, M. (2022). Architecture and artificial intelligence, machine hallucination. Architectural Design, 92. 6–14, 38–46, 122–124.
• Dorst, K. (2010). The Nature of Design Thinking. In K. Dorst, S. Stewart,

I. Staudinger, B. Paton, & A. Dong (Eds.), Proceedings of the 8th Design Thinking Research Symposium. Sydney. 131–139.

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

• Friedman, Y. (1974). My guide how city dwellers can plan their buildings and cities themselves. Düsseldorf: Bertelsmann Fachverlag.

• Hoar, C., Atkin, B., & King, K. (2017). Artificial Intelligence: What it means for the built environment. London: Royal Institution of Chartered Surveyors.

• Hofmann, S. (2014). Architecture is participation, die baupiloten-method and project. Berlino: Jovis.

• Hofmann, S. (2019). Architecture Is Participation. Jovis.

• Joint Research Centre (JRC). (2020). Citizen Engagement in Urban Development.

• Lang, J. (1987). Creating architectural theory: the role of the behavioral sciences in environmental design. New York: Van Nostrand Reinhold.

• Lawson, B. (2005). How Designers Think: the design process demystified. Oxford: Elsevier.

• Leach, N. (2021). Architecture in the Age of Artificial Intelligence.

• Melles, G. (2010). Curriculum design thinking, a new name for old ways of thinking and practice? In K. Dorst, S. Stewart, I. Staudinger, B. Paton, & A. Dong (Eds.), Proceedings of the 8th Design Thinking Research Symposium. Sydney. 299–308.

• Missen, M. (2012). L'incubo della partecipazione. Berlino: Archive Books.

• Matsuda, K. Hyper Reality. Lecture.

• Norman, D. A. (2002). The Design of Everyday Things. Basic Books.

• Paes, D., Arantes, E., & Irizarry, J. (2017). Immersive environment for improving the understanding of architectural 3D models: Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems. Automation in Construction, 84. 292–303.

• Pallasmaa, J. (2012). The eye of the skin: architecture and the sense. Chichester, East Sussex, United Kingdom: Wiley.

• Rivista delle politiche sociali / Italian Journal of Social Policy. (2019). 71–92.

• Saraceno, C. (2016). Coppie e famiglie. Non è questione di natura. Mila-

no: Feltrinelli.
• Sanoff, H. (2000). Multiple views of participatory design. Journal of the Faculty of Architecture, 2. 131–143.
• Whyte, J., & Nikolić, D. (2018). Virtual Reality and the Built Environment. New York: Routledge.
• Yilmaz, M. (2019). Virtual reality as a tool for participatory architectural design. Ankara, Conference: Sustainable Innovation.
• Zheng, H. (2022). Geometry and Topology: Building Machine Learning Surrogate Models with Graphic Statics Method. Doctoral dissertation, University of Pennsylvania.
• Zheng, H., & Huang, W. (2018). Architectural drawings recognition and generation through machine learning. Cambridge.

3.6.4 Architettura operativa del modello progettuale

• Bhatia, M. (2023). Co-Design Canvas & Studio in Flux. Columbia University
• Brunetti, G. (2023). L'intelligenza artificiale nella progettazione.
• Hofmann, S. (2018). Didactic Spaces and Participatory Design. Interview, TU Berlin.
• Lawson, B. (2005). How Designers Think. Routledge.
• Leach, N. (2021). Architecture in the Age of Artificial Intelligence. Bloomsbury.
• Ruotolo, F. (2021). Big Data e diritto: architettura del dato e dello spazio. Edizioni Scientifiche Italiane.
• Supporto o automazione nelle decisioni: il ruolo dell'IA. (2022). Politecnico di Torino.
• Techne Special Series, Vol. 2. (2021).
• Virtual Reality as a Tool for Participatory Architectural Design. Techne Journal. (2021).

3.7 Analisi dei dati nella progettazione partecipata e sistemi di Intelligenza artificiale

• Barocas, S., Hardt, M., & Narayanan, A. (2019). Fairness and Machine Learning. MIT Press.
• Batty, M. (2013). The New Science of Cities. MIT Press.

• Boyd, D., & Crawford, K. (2012). Critical Questions for Big Data. Information, Communication & Society.
• Domingos, P. (2015). The Master Algorithm. Basic Books.
• Michener, W. K. et al. (2012). Participatory Design of DataONE. Ecological Informatics.
• Sanders, E. B. N., & Stappers, P. J. (2008). Co-creation and the New Landscapes of Design. CoDesign.
• Tukey, J. (1977). Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley.

3.7.2 Costruzione dei questionari digitali

• Blomkamp, E. (2018). The Promise of Co-Design for Public Policy. Australian Journal of Public Administration.
• Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika.
• Harari, Y. N. (2018). Homo Deus. Bompiani.
• Hofmann, S. (2019). Architecture is Participation. Jovis.
• Leach, N. (2021). Architecture in the Age of Artificial Intelligence. Bloomsbury.
• Likert, R. (1932). A Technique for the Measurement of Attitudes. Archives of Psychology.
• Norman, D. (2013). La caffettiera del masochista. Giunti.
• Ratti, C., & Claudel, M. (2016). The City of Tomorrow. Yale University Press.
• Udoewa, V. (2019). Radical Participatory Design. Proceedings of the Participatory Design Conference.
• Zevi, B. (1973). Il linguaggio moderno dell'architettura. Einaudi.

3.7.3 Dataset e infrastrutture informative per l'analisi partecipativa

• Barocas, S., Hardt, M., & Narayanan, A. (2019). Fairness and Machine Learning. MIT Press.
• Batty, M. (2013). The New Science of Cities. MIT Press.
• Boyd, D., & Crawford, K. (2012). Critical Questions for Big Data. Information, Communication & Society.
• Domingos, P. (2015). The Master Algorithm. Basic Books.

• Michener, W. K. et al. (2012). Participatory Design of DataONE. Ecological Informatics.
• Sanders, E. B. N., & Stappers, P. J. (2008). Co-creation and the New Landscapes of Design. CoDesign.
• Tukey, J. (1977). Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley.

3.7.4 Analisi dei dataset mediante modelli linguistici

• Aggarwal, C. (2018). Machine Learning for Text. Springer.
• Batty, M. (2013). The New Science of Cities. MIT Press.
• Blei, D., Ng, A., & Jordan, M. (2003). "Latent Dirichlet Allocation". Journal of Machine Learning Research.
• Bommasani, R. et al. (2021). On the Opportunities and Risks of Foundation Models. Stanford CRFM Report.
• Brown, T. et al. (2020). "Language Models are Few-Shot Learners". Advances in Neural Information Processing Systems.
• Cairo, A. (2016). The Truthful Art: Data, Charts, and Maps for Communication. New Riders.
• Carpo, M. (2017). The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence. MIT Press.
• Few, S. (2013). Information Dashboard Design. Analytics Press.
• Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning.
• Jurafsky, D., & Martin, J. (2023). Speech and Language Processing. Pearson.
• Kitchin, R. (2014). The Data Revolution.
• Kitchin, R., & McArdle, G. (2016). "What Makes Big Data, Big Data?". Big Data & Society.
• Leach, N. (2022). Architecture in the Age of Artificial Intelligence. Bloomsbury.
• LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). "Deep Learning". Nature.
• Mikolov, T. et al. (2013). "Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space". arXiv preprint.
• Mitchell, W. (1995). City of Bits. MIT Press.
• O'Neil, C. (2016). Weapons of Math Destruction.
• Silver, D. et al. (2016). "Mastering the Game of Go with Deep Neural Networks and Tree Search". Nature.

• Tufte, E. (2001). The Visual Display of Quantitative Information. Graphics Press.
• Ware, C. (2012). Information Visualization: Perception for Design. Morgan Kaufmann.

3.7.5 Utilizzo dei modelli linguistici nell'analisi dei dati

• Alamasi, R. (2026). Applications of Generative Artificial Intelligence in Architectural Design.
• Batty, M. (2013). The New Science of Cities. MIT Press.
• Bommasani, R. et al. (2021). On the Opportunities and Risks of Foundation Models. Stanford CRFM.
• Carpo, M. (2017). The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence. MIT Press.
• Dortheimer, J. et al. (2024). Evaluating Large Language Model Chatbots to Engage Communities in Large-Scale Design Projects.
• Kitchin, R. (2014). The Data Revolution: Big Data, Open Data, Data Infrastructures and Their Consequences. Sage.
• Leach, N. (2022). Architecture in the Age of Artificial Intelligence. Bloomsbury.
• Zhang, L., & Zheng, Z. (2025). AI-assisted Participatory Design: Performance of Large Language Models in Community Renewal. Journal of Asian Architecture and Building Engineering.
• Zhou, Y. (2025). Examining the Impact of Large Language Models on Design. Design Studies.

3.7.6 Limiti metodologici e condizioni di validità nell'analisi dei dataset

• Batty, M. (2013). The New Science of Cities. Cambridge (MA): MIT Press.
• Bender, E., Gebru, T., McMillan-Major, A., & Shmitchell, S. (2021). "On the Dangers of Stochastic Parrots: Can Language Models Be Too Big?". Proceedings of the ACM Conference on Fairness, Accountability and Transparency.
• Bommasani, R. et al. (2021). On the Opportunities and Risks of Foundation Models. Stanford CRFM.
• Kitchin, R. (2014). The Data Revolution: Big Data, Open Data, Data Infra-

structures and Their Consequences. London: Sage Publications.
• NIST. (2024). AI Risk Management Framework: Generative Artificial Intelligence Profile (NIST AI 600-1).
• Pan, F. et al. (2025). “How Large Language Models Are Transforming Urban Planning”.
• Parlamento europeo e Consiglio dell’Unione europea. (2016). Regolamento (UE) 2016/679 (GDPR).
• Raymond, C. M. et al. (2025). “Uses, Opportunities and Risks of Artificial Intelligence in Participatory Urban Planning”.
• Shneiderman, B. (2022). Human-Centered AI. Oxford University Press.
• Zhang, L., & Zheng, Z. (2025). “AI-assisted Participatory Design: A Study on the Performance of Large Language Models in Community Renewal”. Journal of Asian Architecture and Building Engineering.
• Zhou, Y. (2025). “Examining the Impact of Large Language Models on Design”. Design Studies.
3.7.7 Strumenti generativi per la progettazione architettonica
• Liu, J. et al. (2025). “Computer-aided Layout Generation for Building Design”.
• Lystbæk, M. S. et al. (2025). “Low-resource GAN-stack for High-resolution Floor Plan Generation”.
• OpenAI. API Reference.
• OpenAI. Platform Overview.
• Pan, F. et al. (2025). “How Large Language Models Are Transforming Urban Planning”.
• Yan, S. et al. (2025). “Generative Design for Architectural Spatial Layouts: A Review of Technical Approaches”.
• Zhang, L., & Zheng, Z. (2025). “AI-assisted Participatory Design: A Study on the Performance of Large Language Models in Community Renewal”. Journal of Asian Architecture and Building Engineering.
• Zhou, Y. (2025). “Examining the Impact of Large Language Models on Design”. Design Studies.

3.8 Modelli generativi e intelligenza artificiale nella progettazione architettonica

• Bernstein, P. (2022). Machine Learning: Architecture in the Age of Artificial Intelligence. London: RIBA Publishing.

• Castells, M. (1996). The Rise of the Network Society. Cambridge: Blackwell Publishers.

• Chaillou, S. (2019). AI + Architecture: Towards a New Approach. Harvard Graduate School of Design.

• Chaillou, S. (2022). Artificial Intelligence and Architecture: From Research to Practice. Basel: Birkhäuser.

• Ciribini, G. (1984). Tecnologia e progetto: Argomenti di cultura tecnologica della progettazione. Torino: CELID.

• Cross, N. (1999). "Natural Intelligence in Design". Design Studies, 20(1), 25–39.

• Debney, P. et al. (2022). "Advanced Applications in Computational Design". In M. Bolpagni, R. Gavina, & D. Ribeiro (a cura di), Industry 4.0 for the Built Environment. Cham: Springer, 77–102.

• European Commission. (2020). European enterprise survey on the use of technologies based on artificial intelligence: final report. Publications Office of the European Union.

• European Construction Sector Observatory (ECSO). (2021). Digitalisation in the construction sector.

• European Construction Technology Platform (ECTP). (2018). Artificial Intelligence – Research and Innovation Needs for the Construction and Built Environment Sector.

• Goodfellow, I. et al. (2014). "Generative Adversarial Nets". Advances in Neural Information Processing Systems, 2672–2680.

• Kelly, N., & Gero, J. (2021). "Design Thinking and Computational Thinking: A Dual Process Model for Addressing Design Problems". Design Science, 7.

• Leach, N. (2021). Architecture in the Age of Artificial Intelligence. London: Bloomsbury.

• Lukovich, T. (2023). "Artificial Intelligence and Architecture: Towards a New Paradigm". YBL Journal of Built Environment, 8(1).

• Nauata, N. et al. (2021). "House-GAN++: Generative Adversarial Layout Refinement Networks".

• Pearl, J., & Mackenzie, D. (2018). The Book of Why: The New Science of Cause and Effect. New York: Basic Books.
• Rittel, H. W., & Webber, M. M. (1973). "Dilemmas in a General Theory of Planning". Policy Sciences, 4(2), 155–169.
• Russo Ermolli, S. (2020). The Digital Culture of Architecture. Note sul cambiamento cognitivo e tecnico tra continuità e rottura. Santarcangelo di Romagna: Maggioli.
• Simon, H. A. (1996). The Sciences of the Artificial (3rd ed.). Cambridge (MA): MIT Press.
• Sourek, M. (2024). "Artificial Intelligence: Another Challenge for the Architectural Profession. On True Creativity, Generating by Patterns, and Parametric Evaluation and Optimization".
• Tegmark, M. (2018). Life 3.0: Being Human in the Age of Artificial Intelligence. London: Penguin Books.
• Uzun, C., Çolakoğlu, M. B., & İnceoğlu, A. (2020). "GAN as a Generative Architectural Plan Layout Tool".
• Villaggi, L., & Nagy, D. (2017). "Generative Design for Architectural Space Planning". Autodesk Research.
• Wing, J. (2006). "Computational Thinking". Communications of the ACM, 49(3), 33–35.

3.8.1 Sistemi generativi per la progettazione architettonica

Finch, Finch – Optimizing Architecture, sito ufficiale.
Finch, Finch Guide – Overview, documentazione tecnica ufficiale.
Finch, Finch Guide – Rhino, documentazione tecnica ufficiale.
Finch, Finch Guide – All about Revit, documentazione tecnica ufficiale.
Finch, Finch 101 – Download to Rhino, documentazione tecnica ufficiale.
PlanFinder, PlanFinder, sito ufficiale.
PlanFinder, PlanFinder – Food4Rhino, pagina di distribuzione del plugin.
PlanFinder, End User License Agreement, sito ufficiale.

3.9.1 Attori, strumenti e limiti delle rappresentazioni

• Balzani, M. (2017). La realtà virtuale per la comunicazione dell'architettura.
• Cross, N. (2011). Design Thinking. Oxford: Berg.
• Docci, M., & Maestri, D. (2009). Manuale di rilevamento architettonico e

urbano. Laterza.
• Goldschmidt, G. (2003). “The Backtalk of Self-Generated Sketches”. Design Studies.
• Lawson, B. (2006). How Designers Think. London: Routledge.
• Pallasmaa, J. The Eyes of the Skin.
• Portman, M., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2015). “To Go Where No Man Has Gone Before”. Computers Environment and Urban Systems.
• Schön, D. (1983). The Reflective Practitioner. New York: Basic Books.
• Till, J. (2009). Architecture Depends. Cambridge: MIT Press.
• Whyte, J. (2002). Virtual Reality and the Built Environment. Architectural Press.

3.9.2 Tecnologie immersive per la comunicazione del progetto architettonico

• Deng, Y., Cheng, J., & Anumba, C. (2021). Mapping the Development of BIM and XR Technologies. Automation in Construction.
• Lawson, B. (2006). How Designers Think. Routledge.
• Paes, D., Arantes, E., & Irizarry, J. (2019). Immersive Environments for Design Review. Journal of Information Technology in Construction.
• Paes, D., & Irizarry, J. (2018). Immersive Virtual Reality for Building Design Review. Automation in Construction.
• Portman, M., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2015). “To Go Where No Man Has Gone Before: Virtual Reality in Architecture, Landscape Architecture and Environmental Planning”. Computers, Environment and Urban Systems.
• Radianti, J., Majchrzak, T., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A Systematic Review of Immersive Virtual Reality Applications. Computers & Education.
• Wang, X., Ong, S., & Nee, A. (2018). Augmented Reality in Architecture, Engineering and Construction. Springer.
• Wang, X. et al. (2020). Extended Reality in the Built Environment. Automation in Construction.
• Whyte, J. Virtual Reality and the Built Environment. Architectural Press.

3.9.3.1 Ambienti in realtà virtuale iperealistici

• Paes, D., & Irizarry, J. (2018). “Immersive Virtual Reality for Building Design Review”. Automation in Construction.

• Radianti, J., Majchrzak, T., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). “A Systematic Review of Immersive Virtual Reality Applications”. Computers & Education.

• Whyte, J. (2002). Virtual Reality and the Built Environment. Oxford: Architectural Press.

3.9.3.2 Visualizzazione modelli 3d in realtà aumentata su stampa

• Azuma, R. (1997). “A Survey of Augmented Reality”. Presence: Teleoperators and Virtual Environments.

• Wang, X., Ong, S., & Nee, A. (2018). Augmented Reality in Architecture, Engineering and Construction. Springer.

3.9.3.3 App per la visualizzazione stereoscopica di modelli in realtà aumentata

• Azuma, R. (1997). “A Survey of Augmented Reality”. Presence: Teleoperators and Virtual Environments.

• Wang, X., Ong, S., & Nee, A. (2018). Augmented Reality in Architecture, Engineering and Construction. Springer.

3.9.3.4 Piattaforma per la navigazione spaziale e di feedback: Virtual Tour

• Pallasmaa, J. (2012). The Eyes of the Skin: Architecture and the Senses. Chichester: Wiley.

• Portman, M., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2015). “To Go Where No Man Has Gone Before: Virtual Reality in Architecture”. Computers, Environment and Urban Systems.

• Whyte, J. (2002). Virtual Reality and the Built Environment. London: Routledge.

PARTE 4_ PRODUZIONE

4.1.1 Criticità strutturali nel processo produttivo e costruttivo

• Ball, M. (2015). Rebuilding Construction. Routledge.

• Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2018). BIM Handbook. Wiley.

• Hillebrandt, P. (2000). Economic Theory and the Construction Industry. Macmillan.

• McKinsey Global Institute. (2017). Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity.

• Winch, G. (2010). Managing Construction Projects. Wiley-Blackwell.

• World Economic Forum. (2016). Shaping the Future of Construction.

4.1.2 Industrializzazione e standardizzazione

• Addis, B. (2003). Inventing a History for Structural Engineering Design. In Proceedings of the First International Congress on Construction History.

• Addis, W. (2016). Structural and Civil Engineering Design. London: Routledge.

• Billington, D. P. (1985). The Tower and the Bridge. The New Art of Structural Engineering. New York: Princeton Architectural Press.

• Bock, T., & Langenberg, S. (2014). “Changing Building Sites: Industrialisation and Automation of the Building Process”. Architectural Design, 84.

• Bock, T., & Linner, T. (2015). Robotic Industrialization: Automation and Robotic Technologies for Customized Component, Module, and Building Prefabrication. New York: Cambridge University Press.

• Engel, H. (1968). Structure Systems.

• Giedion, S. (1948). Mechanization Takes Command.

• Gropius, W. (1962). Scope of Total Architecture. New York: Collier Books.

• Herbert, G. (Ed.). (1984). The Packaged House: A Wartime Proposal. In W. Gropius & K. Wachsmann, The Dream of the Factory-Made House. MIT Press.

• Kloft, H. (2005). Textile Architecture. Basel: Birkhäuser.

• Ngowi, A. B., Pienaar, L., Talukhaba, C., & Mbachu, J. J. (2005). “The globalisation of the construction industry – a review”.

• Russell, T. (2005). Standardization.
• Seelow, A. M. (2018). "The Construction Kit and the Assembly Line—Walter Gropius' Concepts for Rationalizing Architecture". Arts, 7(4).

4.1.3 Limiti della standardizzazione

• Addis, B. (2016). Structural and Civil Engineering Design. London: Routledge.
• Billington, D. P. (1985). The Tower and the Bridge. The New Art of Structural Engineering. New York: Princeton Architectural Press.
• Bock, T., & Langenberg, S. (2014). "Changing Building Sites: Industrialisation and Automation of the Building Process". Architectural Design, 84.
• Bock, T., & Linner, T. (2015). Robotic Industrialization: Automation and Robotic Technologies for Customized Component, Module, and Building Prefabrication. New York: Cambridge University Press.
• Engel, H. (1968). Structure Systems.
• Forty, A. (2000). Words and Buildings: A Vocabulary of Modern Architecture. London: Thames & Hudson.
• Frampton, K. (1995). Studies in Tectonic Culture. Cambridge: MIT Press.
• Gropius, W. (1962). Scope of Total Architecture. New York: Collier Books.
• Gropius, W. (1965). The New Architecture and the Bauhaus. Cambridge: MIT Press.
• Herbert, G. (Ed.). (1984). The Packaged House: A Wartime Proposal. In W. Gropius & K. Wachsmann, The Dream of the Factory-Made House. MIT Press.
• Russell, T. (2005). Standardization.
• Seelow, A. M. (2018). "The Construction Kit and the Assembly Line—Walter Gropius' Concepts for Rationalizing Architecture". Arts, 7(4).

4.1.5 Computational design, digital fabrication e automazione della fase del processo produttivo

• Adel, A. Computational Design for Cooperative Robotic Assembly of Nonstandard Timber Frame Buildings. PhD thesis.
• Bock, T., & Linner, T. (2015). Robotic Industrialization: Automation and Robotic Technologies for Customized Component, Module, and Building Prefabrication. New York: Cambridge University Press.
• Jabi, W. (2013). Parametric Design for Architecture. London: Laurence

King Publishing.

• Kloft, H. (2005). "Non-standard structural design for non-standard architecture". In B. Kolarevic & A. Malkawi (Eds.), Performative Architecture: Beyond Instrumentality. London–New York: Taylor & Francis, 135–148.

• Kolarevic, B. (2004). Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing. New York: Taylor & Francis.

• Kunić, A., Naboni, R., Kramberger, A., & Schlette, C. (2021). "Design and Assembly Automation of the Robotic Reversible Timber Beam". Automation in Construction, 123, 103531.

• Leder, S., Wood, D., Weber, R., & Bucklin, O. (2019). "Distributed Robotic Timber Construction". In Ubiquity and Autonomy. Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA 2019).

• Marble, S. (2012). Digital Workflows in Architecture: Designing Design – Designing Assembly – Designing Industry. Basel: Birkhäuser.

• Menges, A. (2015). "Fusing the Computational and the Physical: Towards a Novel Material Culture". Architectural Design, 85(5), 8–15.

• Menges, A. (2015). "The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction". Architectural Design, 85(5), 28–33.

• Menges, A., & Ahlquist, S. (2011). Computational Design Thinking. Chichester: Wiley.

• Mostafavi, S., Bier, H., Bodea, S., & Anton, A. (2015). "Informed Design to Robotic Production Systems – Developing Robotic 3D Printing System for Informed Material Deposition". In Real Time. Proceedings of the 33rd eCAADe Conference, vol. 2. Vienna University of Technology, 287–296.

4.1.6 Mass production e mass customization

• Adel, A. Computational Design for Cooperative Robotic Assembly of Nonstandard Timber Frame Buildings. PhD thesis.

• Bock, T., & Linner, T. (2015). Robotic Industrialization: Automation and Robotic Technologies for Customized Component, Module, and Building Prefabrication. New York: Cambridge University Press.

• Forty, A. (2000). Words and Buildings: A Vocabulary of Modern Architecture. London: Thames & Hudson.

• Frampton, K. (1995). Studies in Tectonic Culture. Cambridge: MIT Press.

• Herbert, G. (Ed.). (1984). The Dream of the Factory-Made House: Walter Gropius and Konrad Wachsmann. Cambridge: MIT Press.
• Kolarevic, B. (2004). Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing. New York: Taylor & Francis.
• Leder, S., Wood, D., Weber, R., & Bucklin, O. (2019). "Distributed Robotic Timber Construction". In Ubiquity and Autonomy. Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA 2019).
• Marble, S. (2012). Digital Workflows in Architecture: Designing Design – Designing Assembly – Designing Industry. Basel: Birkhäuser.
• Menges, A. (2015). "The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction". Architectural Design, 85(5), 28–33.
• Menges, A., & Ahlquist, S. (2011). Computational Design Thinking. Chichester: Wiley.
• Mostafavi, S., Kemper, B. N., & Du, C. (2019). "Materializing Hybridity in Architecture: Design to Robotic Production of Multi-Materiality in Multiple Scales". Architectural Science Review, 62, 424–437.
• Naboni, R., & Paoletti, I. (2015). Advanced Customization in Architectural Design and Construction. Cham: Springer.
• Pine, B. J. (1993). Mass Customization: The New Frontier in Business Competition. Boston: Harvard Business School Press.
• Russell, T. (2005). Standardization.

4.2 Processi di fabbricazione digitale e robotica

• Bock, T., & Linner, T. (2015). Robotic Industrialization: Automation and Robotic Technologies for Customized Component, Module, and Building Prefabrication. New York: Cambridge University Press.
• Gil Pérez, M. Integrative Structural Design Methods for Non-standard Buildings. PhD thesis.
• Khaitan, S. K., & McCalley, J. D. (2014). "Design techniques and applications of cyberphysical systems: A survey". IEEE Systems Journal, 9, 350–365.
• Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). "A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems". Manufacturing

Letters, 3, 18–23.

• Menges, A. (2015). "Fusing the Computational and the Physical: Towards a Novel Material Culture". Architectural Design, 85(5), 8–15.

• Menges, A. (2015). "The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction". Architectural Design, 85(5), 28–33.

• Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., & Stankovic, J. (2010). "Cyber-physical systems: The next computing revolution". Proceedings of the 47th Design Automation Conference, 731–736.

• Vasey, L. Robotic Building as Integration of Design-to-Robotic-Production and -Operation. PhD thesis.

PARTE 5_ COSTRUZIONE

• Atanasova, L., Mitterberger, D., Sandy, T., Gramazio, F., Kohler, M., & Dörfler, K. (2020). Prototype as Artefact: Design Tool for Open-ended Collaborative Assembly Processes. In B. Slocum, V. Ago, S. Doyle, A. Marcus, M. Yablonina, & M. del Campo (Eds.), Proceedings of the 40th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA 2020): Distributed Proximities.

• Gramazio Kohler Research, ETH Zurich. (2019). Augmented Acoustics. ETH Zurich.

• Hansen, S. G., Kunic, A., & Naboni, R. (2021). "A reversible connection for robotic assembly of timber structures". Engineering Structures, 245, 112795.

• Hughes, R., Osterlund, T., & Larsen, N. M. (2021). "Integrated design-for-manufacturing and AR-aided-assembly workflows for lightweight reciprocal frame timber structures". Construction Robotics, 5, 147–157.

• Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification". IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022.

• Kunic, A., Kramberger, A., & Naboni, R. (2021). Cyber-Physical Robotic Process for Re-Configurable Wood Architecture—Closing the circular loop in wood architecture. In Proceedings of the 39th eCAADe Conference: Towards a New, Configurable Architecture. Novi Sad, Serbia.

• Kunic, A., Naboni, R., Kramberger, A., & Schlette, C. (2021). "Design and assembly automation of the Robotic Reversible Timber Beam". Automa-

tion in Construction, 123, 103531.
• Kyjanek, O., al Bahar, B., Vasey, L., Wannemacher, B., & Menges, A. (2019). "Implementation of an augmented reality workflow for human-robot collaboration in timber prefabrication". In Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019), 1223–1230.
• Malik, A. A., & Brem, A. (2021). "Digital Twins for Collaborative Robots: A case study in human-robot interaction". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 68, 102092.
• Settimi, A., Gamerro, J., & Weinand, Y. (2022). "Augmented-reality-assisted timber drilling with smart retrofitted tools". Automation in Construction, 139, 104272.

5.1.1 Assemblaggio collaborativo uomo–robot

• Atanasova, L., Mitterberger, D., Sandy, T., Gramazio, F., Kohler, M., & Dörfler, K. (2020). Prototype as Artefact: Design Tool for Open-ended Collaborative Assembly Processes. In Proceedings of the 40th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA 2020): Distributed Proximities.
• Hansen, S. G., Kunic, A., & Naboni, R. (2021). "A reversible connection for robotic assembly of timber structures". Engineering Structures, 245, 112795.
• Hughes, R., Osterlund, T., & Larsen, N. M. (2021). "Integrated design-for-manufacturing and AR-aided-assembly workflows for lightweight reciprocal frame timber structures". Construction Robotics, 5, 147–157.
• ISO. (2016). ISO/TS 15066:2016 – Robots and robotic devices – Collaborative robots.
• Kunic, A., Naboni, R., Kramberger, A., & Schlette, C. (2021). "Design and assembly automation of the Robotic Reversible Timber Beam". Automation in Construction, 123, 103531.
• Kyjanek, O., al Bahar, B., Vasey, L., Wannemacher, B., & Menges, A. (2019). "Implementation of an augmented reality workflow for human-robot collaboration in timber prefabrication". In Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019), 1223–1230.

5.2 Digital twin e controllo del processo costruttivo

• Hughes, R., Osterlund, T., & Larsen, N. M. (2021). "Integrated design-for-manufacturing and AR-aided-assembly workflows for lightweight reciprocal frame timber structures". Construction Robotics, 5, 147–157.

• Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification". IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022.

• Kunic, A., Kramberger, A., & Naboni, R. (2021). Cyber-Physical Robotic Process for Re-Configurable Wood Architecture—Closing the circular loop in wood architecture. In Proceedings of the 39th eCAADe Conference: Towards a New, Configurable Architecture. Novi Sad, Serbia.

• Kunic, A., Naboni, R., Kramberger, A., & Schlette, C. (2021). "Design and assembly automation of the Robotic Reversible Timber Beam". Automation in Construction, 123, 103531.

• Malik, A. A., & Brem, A. (2021). "Digital Twins for Collaborative Robots: A case study in human-robot interaction". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 68, 102092.

• Settimi, A., Gamerro, J., & Weinand, Y. (2022). "Augmented-reality-assisted timber drilling with smart retrofitted tools". Automation in Construction, 139, 104272.

• Vasey, L. [dati completi da inserire].

5.2.1 Monitoraggio, diagnostica e decision making

• Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification". IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022.

• Malik, A. A., & Brem, A. (2021). "Digital Twins for Collaborative Robots: A case study in human-robot interaction". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 68, 102092.

• Vasey, L. [dati completi da inserire]. Robotic Building as Integration of Design-to-Robotic-Production and -Operation.

• [Angeletti, dati completi da inserire]. Human-Robot Collaborative Assembly with Mixed Reality (MR) and Material Digital Twin (MDT).

5.2.2 Material Digital Twin e tracciabilità dei componenti

• [Angeletti, dati completi da inserire]. Human-Robot Collaborative Assembly with Mixed Reality (MR) and Material Digital Twin (MDT).
• Hughes, R., Osterlund, T., & Larsen, N. M. (2021). "Integrated design-for-manufacturing and AR-aided-assembly workflows for lightweight reciprocal frame timber structures". Construction Robotics, 5, 147–157.
• Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification". IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022.
• Kunic, A., Kramberger, A., & Naboni, R. (2021). Cyber-Physical Robotic Process for Re-Configurable Wood Architecture—Closing the circular loop in wood architecture. In Proceedings of the 39th eCAADe Conference: Towards a New, Configurable Architecture. Novi Sad, Serbia.
• Kunic, A., Naboni, R., Kramberger, A., & Schlette, C. (2021). "Design and assembly automation of the Robotic Reversible Timber Beam". Automation in Construction, 123, 103531.
• Malik, A. A., & Brem, A. (2021). "Digital Twins for Collaborative Robots: A case study in human-robot interaction". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 68, 102092.

5.3 Sistemi XR per il montaggio e l'iterazione operativa

• Alizadehsalehi, S., Hadavi, A., & Huang, J. C. (2020). "From BIM to extended reality in AEC industry". Automation in Construction, 116, 103254.
• Atanasova, L., Mitterberger, D., Sandy, T., Gramazio, F., Kohler, M., & Dörfler, K. (2020). Prototype as Artefact: Design Tool for Open-ended Collaborative Assembly Processes. In Proceedings of the 40th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA 2020): Distributed Proximities.
• Hughes, R., Osterlund, T., & Larsen, N. M. (2021). "Integrated design-for-manufacturing and AR-aided-assembly workflows for lightweight reciprocal frame timber structures". Construction Robotics, 5, 147–157.
• Settimi, A., Gamerro, J., & Weinand, Y. (2022). "Augmented-reality-assisted timber drilling with smart retrofitted tools". Automation in Construction, 139, 104272.
• Vasey, L. [dati completi da inserire]. Robotic Building as Integration of Design-to-Robotic-Production and -Operation.

5.4 Introduzione al diagramma di flusso tra produzione e costruzione

• Ahmadian, A. A. (2020). Computational Design for Cooperative Robotic Assembly of Nonstandard Timber Frame Buildings. Diss. ETH No. 26562, ETH Zürich.

• De Wolf, C., Byers, B. S., Raghu, D., Gordon, M., Schwarzkopf, V., & Triantafyllidis, E. (2024). "A 5D Digital Circular Workflow: Digital Transformation Towards Matchmaking of Environmentally Sustainable Building Materials through Reuse from Disassembly".

• Kunić, A. (2024). Reconfigurable Wood Architecture. A Cyber-Physical Approach for Circular Design and Construction. PhD Dissertation, University of Southern Denmark, Faculty of Engineering.

• Kunić, A., Cognoli, R., & Naboni, R. (2023). "RE:Thinking Timber Architecture. Enhancing Design and Construction Circularity Through Material Digital Twin." In M. R. Thomsen, C. Ratti, & M. Tamke (a cura di), Design for Rethinking Resources. Cham: Springer, 409–422.

• Kunić, A., Kramberger, A., & Naboni, R. (2021). "Cyber-Physical Robotic Process for Re-Configurable Wood Architecture. Closing the Circular Loop in Wood Architecture." In Proceedings of the 39th eCAADe Conference – Towards a New, Configurable Architecture. Novi Sad, 181–188.

• Kunić, A., Naboni, R., Kramberger, A., & Schlette, C. (2021). "Design, Simulation and Robotic Assembly of Reversible Timber Structures." Construction Robotics, 5, 1–10.

• Kyjanek, O., Al Bahar, B., Vasey, L., Wannemacher, B., & Menges, A. (2019). "Implementation of an Augmented Reality AR Workflow for Human Robot Collaboration in Timber Prefabrication." In Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019). Banff, 1223–1230.

• Menges, A. (2015). "The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction." Architectural Design, 85(5), 28–33.

• Nahmad Vazquez, A., Garivani, S., & Dackiw, J.-N. (2024). "Decentralized, Data-Informed, Robotic-Based Digital Timber Micro-Factories." Construction Robotics, 8.

• Onalan, B., Mitropoulou, I., Triantafyllidis, E., Hunhevicz, J., & De Wolf, C. (2025). "Computational Methods for Circular Design with Non-Standard

Materials: Systematic Review and Future Directions." International Journal of Architectural Computing.

• UNI 10838. (1999). Edilizia – Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia.

• Vasey, L. (2021). Strategies for Cyber-Physical Robotic Fabrication and Construction in Architecture. Stuttgart: Institute for Computational Design and Construction, University of Stuttgart.

• Yang, X., Amtsberg, F., Skoury, L., Wagner, H. J., & Menges, A. (2022). "VIZOR: Facilitating Cyber-Physical Workflows in Prefabrication Through Augmented Reality." In Post-Carbon. Proceedings of the 27th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2022), vol. 2, 141–150.

| GLOSSARIO

• Accountability: principio di responsabilità e trasparenza procedurale nella gestione dei processi, delle decisioni e dei soggetti coinvolti.
• Accessibilità universale: insieme di requisiti spaziali, percettivi e funzionali che rendono gli ambienti fruibili da tutti, indipendentemente da età, condizioni fisiche o disabilità.
• Accessibility Statement: documento che certifica le prestazioni di accessibilità fisica, percettiva e d'uso di un edificio o di un servizio.
• Adaptable Dwelling: alloggio predisposto a evolvere nel tempo senza interventi invasivi, in risposta a mutamenti d'uso o di utenza.
• Adattabilità: capacità dell'edificio di modificare la propria configurazione per rispondere a nuove esigenze funzionali, ambientali o sociali.
• Adattamento climatico: insieme di strategie progettuali e gestionali finalizzate a ridurre la vulnerabilità degli edifici agli effetti del cambiamento climatico.
• Adeguamento sismico: intervento che porta l'edificio a livelli di sicurezza assimilabili a quelli richiesti per le nuove costruzioni.
• AI generativa: forma di intelligenza artificiale capace di produrre contenuti, scenari o soluzioni progettuali sulla base di dati, vincoli e obiettivi.
• Ambiente CDE immersivo: estensione tridimensionale e interattiva del Common Data Environment, in cui più attori possono collaborare in tempo reale entro uno spazio digitale condiviso.
• Analisi SWOT: strumento strategico utilizzato per individuare punti di forza, debolezze, opportunità e minacce di un progetto o di un processo.
• Appalto: contratto mediante il quale un'impresa si impegna a eseguire un'opera o un servizio per conto della committenza secondo condizioni definite.
• Approccio prescrittivo: modello normativo basato su parametri rigidi e predefiniti di conformità, come misure minime, distanze o requisiti dimensionali.
• Approccio prestazionale: modello normativo e progettuale fondato su obiettivi di risultato e performance verificabili, lasciando libertà nella scelta dei mezzi.
• Barriera architettonica: ostacolo fisico o spaziale che limita mobilità, autonomia, orientamento o sicurezza degli utenti.
• BIM (Building Information Modeling): metodologia digitale per la model-

lazione e gestione integrata di geometrie, dati, materiali e processi lungo il ciclo di vita dell'opera.

• BIM 7D: estensione del BIM orientata alla gestione, manutenzione e monitoraggio prestazionale dell'edificio nel tempo.

• BIM Data Analyst: professionista specializzato nell'analisi e interpretazione dei dati contenuti nei modelli BIM a supporto delle decisioni progettuali e gestionali.

• Biforcazione: punto del processo in cui il flusso può assumere direzioni diverse in funzione di scelte, condizioni o vincoli.

• Building Logbook: registro digitale dell'edificio che raccoglie dati su materiali, manutenzioni, prestazioni, trasformazioni e condizioni d'uso lungo il ciclo di vita.

• Cantiere: spazio fisico, tecnico e organizzativo in cui avviene la realizzazione materiale dell'opera edilizia.

• CDE (Common Data Environment): ambiente digitale condiviso per l'archiviazione, gestione e scambio collaborativo dei dati e dei modelli informativi.

• Ciclo aperto: modello interpretativo del processo edilizio in cui le fasi si influenzano reciprocamente e rimangono suscettibili di adattamento e revisione.

• Ciclo di vita dell'edificio: insieme delle fasi di programmazione, progettazione, costruzione, uso, manutenzione, trasformazione e dismissione dell'opera.

• Circularity Plan: piano che definisce criteri e strategie di riuso, smontaggio, recupero e riciclabilità dei materiali e dei componenti edilizi.

• Climate Resilience Plan: documento che definisce strategie e misure per fronteggiare eventi climatici estremi e rafforzare la resilienza dell'edificio o del contesto urbano.

• Cloud collaborativo: ambiente digitale online che consente a più attori di lavorare simultaneamente su dati, documenti e modelli condivisi.

• Co-progettazione: modalità di elaborazione condivisa del progetto basata sulla collaborazione tra progettisti, utenti, gestori, istituzioni e altri portatori di interesse.

• Collo di bottiglia: fase o nodo del processo in cui si concentrano ritardi, inefficienze o rallentamenti.

• Collaudo: procedura di verifica tecnica, funzionale e documentale dell'opera al termine della costruzione.
• Comfort percettivo: qualità sensoriali e cognitive dello spazio che facilitano orientamento, comprensione, benessere e uso degli ambienti.
• Comfort sensoriale: insieme delle condizioni percettive di un ambiente, come luce, suono, temperatura, odore e qualità dell'aria, che ne determinano la qualità esperienziale.
• Common Data Environment (CDE): ambiente digitale condiviso per l'archiviazione e la gestione collaborativa dei dati progettuali e gestionali.
• Consultazione pubblica: fase di ascolto aperto in cui cittadini e soggetti interessati possono esprimere osservazioni, bisogni o valutazioni.
• Common Data Environment immersivo: ambiente collaborativo digitale tridimensionale nel quale i dati informativi vengono esplorati in forma spaziale e interattiva.
• Common Data Environment: infrastruttura digitale condivisa per raccogliere, organizzare, verificare e distribuire informazioni tra i soggetti del processo edilizio.
• Coordinatore per la Sicurezza in fase di esecuzione (CSE): figura tecnica incaricata del controllo dell'applicazione delle misure di sicurezza durante il cantiere.
• Comfort sensoriale: insieme delle caratteristiche percettive di un ambiente che ne determinano il livello di qualità esperienziale.
• Cronoprogramma: strumento che pianifica e monitora la sequenza temporale delle lavorazioni e delle attività di progetto o di cantiere.
• Cultura del progetto: insieme di valori, saperi, visioni e pratiche che orientano la trasformazione dell'ambiente costruito oltre la sola dimensione tecnica.
• Digital Construction Manager: figura professionale specializzata nella gestione integrata e digitale dei processi edilizi, con competenze in BIM, flussi informativi e project management.
• Digital Coordination Plan: documento che disciplina la gestione dei dati, i ruoli e le responsabilità informative nella fase progettuale.
• Digital divide professionale: dislivello tra le competenze digitali richieste dal settore e quelle effettivamente possedute da tecnici e professionisti.
• Digital Twin: gemello digitale dinamico di un edificio o di un sistema,

aggiornato attraverso dati reali per finalità di simulazione, monitoraggio e gestione.

• Digital twin urbano: modello digitale dinamico della città, alimentato da dati in tempo reale, per supportare simulazione, gestione e pianificazione urbana.

• Dialogo competitivo: procedura di gara in cui la stazione appaltante avvia un confronto con gli operatori economici per definire la soluzione più adatta.

• Direttore dei Lavori (DL): tecnico incaricato del controllo della corretta esecuzione dell'opera in conformità al progetto, al contratto e alle norme vigenti.

• Drift- och Underhållsplan: piano svedese di gestione e manutenzione, concepito come documento aggiornabile durante l'esercizio dell'edificio.

• Edificio evolutivo: costruzione concepita per modificare nel tempo assetti distributivi, funzionali o prestazionali.

• Empowerment: acquisizione di capacità di incidere realmente sui processi decisionali da parte delle comunità o dei soggetti coinvolti.

• Energy Manager: figura incaricata di monitorare, gestire e ottimizzare i consumi energetici di edifici e impianti.

• EPBD: direttive europee relative alla prestazione energetica degli edifici e al miglioramento dell'efficienza del patrimonio edilizio.

• Esecuzione: fase operativa del processo edilizio in cui il progetto viene realizzato materialmente.

• Facility Feedback Plan: programma di raccolta, gestione e interpretazione dei dati relativi all'esperienza d'uso e al comportamento dell'edificio in esercizio.

• Facility Information Model: modello informativo orientato alla gestione prestazionale e manutentiva dell'edificio in esercizio.

• Facility Management: insieme integrato di servizi, attività e strumenti destinati alla gestione efficiente degli edifici e degli spazi.

• Feedback Loop: meccanismo di apprendimento continuo che collega dati d'uso reale, valutazione delle prestazioni e miglioramento progettuale o normativo.

• Flusso: sequenza ordinata di operazioni o passaggi all'interno di un processo.

• Frammentazione normativa: sovrapposizione e disallineamento di norme, regolamenti e competenze tra livelli amministrativi diversi.
• Frammentazione sistemica: mancanza di coerenza e continuità tra soggetti, strumenti e processi all'interno di una filiera digitale.
• Gemello Digitale del Centro Storico di Firenze: progetto pilota avviato nel 2023 che integra dati urbani, modelli predittivi e strumenti di simulazione per la gestione del patrimonio storico.
• Gestione edilizia: fase post-costruttiva del processo edilizio orientata alla conservazione, trasformazione, manutenzione e valorizzazione dell'opera.
• Governance del dato: insieme di regole, strumenti e responsabilità finalizzati a garantire integrità, accessibilità, tracciabilità e sicurezza dei dati.
• Governance multilivello: sistema di coordinamento tra diversi livelli istituzionali e operativi, fondato su responsabilità distribuite.
• HBIM (Historic BIM): modello digitale informativo utilizzato per il rilievo, la rappresentazione e la gestione del patrimonio costruito storico.
• IAQ (Indoor Air Quality): qualità dell'aria negli ambienti chiusi, valutata in relazione a salubrità, comfort e concentrazione di inquinanti.
• IFC (Industry Foundation Classes): standard aperto per l'interoperabilità dei dati tra software e piattaforme nel settore AEC.
• Intelligenza Artificiale (IA): insieme di tecniche e algoritmi che consentono alle macchine di apprendere dai dati, supportare decisioni o generare soluzioni.
• Intelligenza collettiva: capacità distribuita di apprendimento e decisione che emerge dalla cooperazione tra soggetti umani e sistemi tecnologici.
• Interfaccia dinamica: rappresentazione progettuale interattiva, modificabile e capace di dialogare con utenti, dati e contesto.
• Interoperabilità: capacità di sistemi, software e piattaforme di scambiare dati in modo affidabile, aperto e compatibile, senza perdita di informazione.
• Intervento sinergico: operazione che integra più obiettivi, come sicurezza, efficienza energetica, accessibilità e qualità ambientale, entro un'unica strategia.
• IoT (Internet of Things): rete di dispositivi intelligenti connessi, capaci di raccogliere, trasmettere e scambiare dati.

• Isola di calore urbana: fenomeno per cui la temperatura delle aree urbane risulta più elevata rispetto alle zone rurali circostanti.
• Layout flessibile: organizzazione spaziale che consente la riconfigurazione degli ambienti con interventi minimi.
• Maintenance Manual: documento operativo, spesso allegato al modello informativo, che descrive modalità e procedure per la gestione e la manutenzione dell'edificio.
• Manutenzione predittiva: strategia gestionale che utilizza dati, sensori e modelli previsionali per anticipare guasti o anomalie.
• Material Passport: documento digitale che registra caratteristiche, origine, prestazioni ambientali e possibilità di recupero dei materiali.
• Miglioramento sismico: intervento che aumenta la sicurezza strutturale senza raggiungere i livelli richiesti alle nuove costruzioni.
• Miljöbyggnad: sistema svedese di certificazione ambientale che integra criteri energetici, ambientali e di qualità percepita.
• Modernizzazione apparente: adozione superficiale di tecnologie digitali senza una reale trasformazione organizzativa o processuale.
• Modello adattivo: struttura progettuale capace di evolvere nel tempo in risposta a mutamenti ambientali, sociali o tecnici.
• Modello informativo: sistema strutturato di dati utilizzato per rappresentare, analizzare e gestire digitalmente un'opera edilizia.
• Monitoraggio ex ante: insieme delle verifiche svolte prima della messa in esercizio dell'edificio.
• nZEB (Nearly Zero Energy Building): edificio a consumo energetico quasi nullo, caratterizzato da fabbisogni molto bassi coperti in larga parte da fonti rinnovabili.
• Neutralità tecnologica: principio secondo cui la norma o il sistema non dovrebbe privilegiare specifiche tecnologie, pur potendo nella pratica riflettere visioni implicite.
• Nodo decisionale: punto del processo in cui è necessario assumere una scelta strategica.
• Normativismo incrementale: produzione legislativa per accumulo progressivo di provvedimenti, spesso reattivi e privi di una strategia organica unitaria.
• Paradigma informativo: modello teorico in cui la conoscenza, l'organiz-

zazione e il controllo del progetto si fondano su flussi informativi codificati e interoperabili.

• Partecipazione: coinvolgimento attivo dei portatori di interesse nella definizione, gestione e valutazione del progetto.

• Participation and Evaluation Plan (PEP): documento che definisce modalità, tempi e strumenti della consultazione e della valutazione partecipativa.

• Piano di Adattabilità: documento che definisce strategie, condizioni e margini di riconfigurazione futura dell'edificio.

• Piano di Manutenzione: documento tecnico che definisce attività, controlli e operazioni necessarie a mantenere nel tempo le prestazioni previste dell'opera.

• Piano di Manutenzione (Italia): elaborato tecnico allegato al progetto esecutivo, finalizzato alla conservazione dell'opera, ma non necessariamente aggiornato durante l'esercizio.

• Piattaforma adattiva: modello progettuale o gestionale in grado di evolvere in funzione dei dati, delle interazioni e dei cambiamenti del contesto.

• Post-Occupancy Evaluation (POE): metodo strutturato di raccolta e analisi dei dati sul funzionamento reale e sulla qualità percepita dell'edificio dopo l'entrata in esercizio.

• Processo edilizio: sequenza articolata di fasi — programmazione, progettazione, produzione, costruzione e gestione — che conduce alla realizzazione e trasformazione dell'ambiente costruito.

• Produzione edilizia: fase intermedia in cui il progetto viene tradotto in atti esecutivi, contratti, risorse e condizioni operative per il cantiere.

• Progettazione partecipata: processo che coinvolge utenti e portatori di interesse nella definizione delle scelte progettuali.

• Progettazione passiva: approccio che utilizza strategie bioclimatiche e soluzioni architettoniche per migliorare le condizioni ambientali senza ricorrere a sistemi meccanici.

• Progettista capogruppo: professionista incaricato di coordinare i diversi specialisti coinvolti nel processo progettuale.

• Progetto esecutivo: livello più avanzato della progettazione, comprensivo di tutti i dettagli tecnici e costruttivi necessari alla realizzazione.

• Project Management Integrato: metodo di coordinamento di risorse,

tempi, informazioni e obiettivi mediante strumenti digitali condivisi.

• Protocollo di Dialogo: report ufficiale che documenta le fasi, gli strumenti e gli esiti del processo partecipativo.

• Protocollo Itaca: sistema volontario di certificazione ambientale degli edifici sviluppato in ambito italiano.

• PSC (Piano di Sicurezza e Coordinamento): documento obbligatorio di cantiere che organizza le misure di sicurezza operative e il coordinamento tra i soggetti coinvolti.

• Quality Experiential Indicators: parametri utilizzati per valutare qualità sensoriale, cognitiva e percettiva dell'esperienza spaziale.

• Quality-in-Use: concetto che indica il livello di comfort, funzionalità e soddisfazione percepito dagli utenti reali durante l'uso dell'edificio.

• Qualità percepita: grado di soddisfazione degli utenti rispetto alle caratteristiche spaziali, funzionali, ambientali e relazionali dell'edificio.

• Realtà aumentata (AR): tecnologia che sovrappone informazioni digitali al mondo reale, migliorando lettura, interazione e controllo dell'ambiente costruito.

• Resilienza edilizia: capacità dell'edificio di mantenere funzionalità, sicurezza e comfort in condizioni di stress ambientale o d'uso.

• Resilienza sismica: capacità di un edificio o di un sistema di mantenere funzioni essenziali e recuperare operatività dopo un evento sismico.

• Resistenza culturale: opposizione, inerzia o difficoltà delle organizzazioni e dei professionisti nell'adottare innovazioni tecnologiche.

• Responsabile Unico del Progetto (RUP): figura di coordinamento dell'intero processo, con responsabilità amministrative, tecniche e procedurali.

• Ritorno: passaggio del flusso che riporta a una fase precedente per revisione, correzione o aggiornamento.

• SAL (Stato di Avanzamento Lavori): documento contabile che certifica l'avanzamento dell'opera ai fini dei pagamenti.

• Safety and Resilience Plan: documento che definisce criteri e strategie per la gestione integrata dei rischi e della resilienza.

• SCADA: sistema di supervisione, controllo e acquisizione dati utilizzato per monitorare in tempo reale impianti e sistemi tecnologici complessi.

• Simulazione climatica evolutiva: modello previsionale che valuta le performance dell'edificio su scenari climatici futuri.

• Simulazione microclimatica: analisi dinamica delle condizioni ambientali interne ed esterne in relazione a clima, forma e materiali.
• Sismabonus: incentivo fiscale destinato a interventi di miglioramento o adeguamento sismico.
• Sistema transcalare: rete di relazioni che opera su più livelli spaziali e decisionali, dal dettaglio costruttivo alla scala urbana.
• Soglia: punto di transizione o condizione critica che modifica lo stato del processo.
• Soglia critica: momento di transizione del processo in cui si assumono decisioni strategiche con effetti duraturi sulla qualità dell'opera.
• Strategie passive: soluzioni architettoniche e ambientali che migliorano le condizioni interne senza ricorso a impianti attivi, come ombreggiamento, ventilazione naturale o massa termica.
• Subappalto: affidamento a soggetti terzi dell'esecuzione di una parte dell'opera o delle lavorazioni.
• SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems): sistemi di drenaggio urbano sostenibile progettati per gestire acque meteoriche e ridurre il rischio idraulico.
• Tokenism: forma di coinvolgimento simbolico che non produce effetti sostanziali sulle decisioni.
• Tracciabilità informativa: aggiornamento, archiviazione e ricostruzione continua dei dati tecnici, progettuali, costruttivi e gestionali dell'opera.
• Trasmittanza termica: indicatore della capacità di un materiale o componente di disperdere calore attraverso la propria struttura.
• UNI 8290/10838/11838: insieme di norme tecniche italiane che classificano requisiti edilizi, fasi del processo edilizio e processi manutentivi lungo il ciclo di vita.
• UNI 10838: norma tecnica che definisce la sequenza e le condizioni delle fasi del processo edilizio.
• Universal Design: approccio progettuale orientato alla realizzazione di ambienti fruibili dal maggior numero di persone senza adattamenti successivi.
• Usabilità percepita: livello di comfort, autonomia, sicurezza e comprensibilità percepito dall'utente nell'esperienza d'uso.
• User Experience Report: relazione che documenta il grado di fruibilità

reale di uno spazio attraverso il contributo diretto di utenti e associazioni.

• Validazione del progetto: controllo tecnico e normativo indipendente finalizzato a verificare coerenza, affidabilità e cantierabilità del progetto.

• Variante in corso d'opera: modifica del progetto iniziale introdotta durante l'esecuzione dei lavori.

• VOC (Composti Organici Volatili): sostanze chimiche aerodisperse presenti negli ambienti indoor, potenzialmente nocive per salute e comfort.

| ABBREVIAZIONI

A

AEC – Architecture, Engineering and Construction

ADA – Automated Data Acquisition

AI – Artificial Intelligence / Intelligenza Artificiale

ANCE – Associazione Nazionale Costruttori Edili

API – Application Programming Interface

AR – Augmented Reality

B

BIM – Building Information Modeling

C

CAD – Computer-Aided Design

CAE – Computer-Aided Engineering

CAM – Computer-Aided Manufacturing

CDE – Common Data Environment

CNC – Computer Numerical Control

CNAPPC – Consiglio Nazionale degli Architetti Pianificatori Paesaggisti e Conservatori

CNR – Consiglio Nazionale delle Ricerche

CoD – Co-design

D

DfMA – Design for Manufacturing and Assembly

D.Lgs. – Decreto Legislativo

DT – Digital Twin

E

ECTP – European Construction Technology Platform

ECSO – European Construction Sector Observatory

EDA – Exploratory Data Analysis

ENEA – Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

EPBD – Energy Performance of Buildings Directive

G

GAN – Generative Adversarial Network

GD – Generative Design

GDPR – General Data Protection Regulation

GIS – Geographic Information Systems

GPT – Generative Pre-trained Transformer

GSAPP – Graduate School of Architecture, Planning and Preservation (Columbia University)

H

HBIM – Historic Building Information Modeling

HTTP – HyperText Transfer Protocol

I

IA – Intelligenza Artificiale

IFC – Industry Foundation Classes

ISO – International Organization for Standardization

IoT – Internet of Things

L

LLM – Large Language Model

M

MDT – Material Digital Twin

MIT – Massachusetts Institute of Technology

MIT – Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

ML – Machine Learning

MMC – Modern Methods of Construction

MR – Mixed Reality

N

NEB – New European Bauhaus

P

PD – Participatory Design

Q

QR – Quick Response Code

R

RIBA – Royal Institute of British Architects

ROS – Robot Operating System

RPD – Radical Participatory Design

S

SDK – Software Development Kit

U

UI – User Interface

UNI – Ente Italiano di Normazione

UX – User Experience

V

VOC – Volatile Organic Compounds

VR – Virtual Reality

W

WHO – World Health Organization

X

XR – Extended Reality

3

3D – Three Dimensional

a LUISA e GAETANO..