Università Iuav
di Venezia

DOTTORATO IN
ARCHITETTURA, CITTÀ E DESIGN

CURRICULUM
NUOVE TECNOLOGIE E INFORMAZIONE
PER L'ARCHITETTURA, LA CITTÀ E IL TERRITORIO
XXXI CICLO

DIPARTIMENTO CULTURE DEL PROGETTO

Think Wood

L'architettura in legno: l'automazione e la robotica per le carpenterie del Nordest

Dottoranda
Margherita Ferrari

Supervisore
MariaAntonia Barucco

Think Wood

L’architettura in legno: l’automazione e la robotica per le carpenterie del Nordest

Introduzione

Capitolo uno

L'automazione e i robot **19**

1.1 Automatismo e automa 25
1.2 L'automa e la macchina 27
1.3 La macchina e il robot 28
1.4 Le generazioni dei robot 32
1.5 Una classificazione della robotica 34

Capitolo due

L'automazione e l'architettura **43**

2.1 L'industrializzazione e la prefabbricazione 48
2.2 L’industrializzazione edilizia in Italia 53
2.3 La digitalizzazione del progetto 58
2.4 L’automazione della produzione 60
2.5 Le trasformazioni della produzione 68
2.6 La manifattura ibrida 69
2.7 Il progetto della flessibilità standardizzata 72

Capitolo tre

L'automazione nella carpenteria lignea **89**

3.1 Le lavorazioni del legno 96
3.2 La classificazione degli elementi in legno 98
3.3 Le categorie d'impiego dei prodotti in legno 100
3.4 Lo sviluppo dei prodotti a base legno 102
3.5 Gli strumenti per la lavorazione del legno 105
3.6 Le macchine CNC e i robot 111
3.7 Sostenibilità, durevolezza, durabilità 116
3.8 Prospettive di sviluppo 126
3.9 Headmade 140

I CASI STUDIO 146
TAMEDIA CENTRE Zurigo 2013 150
ASILO NIDO LA BALENA Guastalla 2015 156
MAGGIE'S MANCHESTER Manchester 2016 162
SEQUENTIAL ROOF Zurigo 2016 168
PADIGLIONE VIDY Losanna 2017 174
GRADUAL ASSEMBLIES Roma 2018 180
RIFUGIO OBERHOLZ Bolzano 2017 184

Capitolo quattro

La trasformazione carpenteria lignea: il caso del Nordest **195**

4.1 L'evoluzione normativa per l'impiego del legno 200
4.2 Impiego e prospettive dell'automazione: un questionario 206
4.3 La definizione della popolazione 212
4.4 Struttura e contenuti 213
4.5 Raccolta dei dati ed esiti 221
4.6 Esiti ed analisi critica 224
4.7 Automazione consapevole 229
4.8 Robotica consapevole 231
4.9 La carpenteria diffusa 232

Conclusioni **239**

Bibliografia **247**

Glossario **259**

Introduzione

La tesi di dottorato descrive l'impiego dell'automazione e della robotica nella filiera dell'architettura e, in particolare, analizza le difficoltà e le opportunità connesse all'impiego delle nuove tecnologie nella progettazione e nella produzione di componenti strutturali lignei. Ciò è stato fatto attraverso un'indagine multidisciplinare che ha cercato il dialogo con professionisti del mondo industriale e ricercatori di vari enti e atenei.

Nonostante le tecnologie dell'automazione siano oggi sempre più accessibili, anche grazie ad appositi incentivi rivolti all'innovazione e allo sviluppo tecnologico delle aziende, esiste il rischio di non comprendere le potenzialità o di non sfruttare appieno le caratteristiche delle macchine. La tesi legge tale condizione (osservando in particolare il contesto del Nordest) e in essa riconosce una complessa sfida per la diffusione dell'innovazione: non è l'impiego di una macchina CNC o di un braccio robotico a determinare il grado di innovazione di un'impresa o di un prodotto, di una manifattura o di un'industria. La tesi sostiene che è il grado di consapevolezza e di *know-how* proprio di una rete di studiosi, progettisti, professionisti, artigiani, aziende e utenti a determinare se e come un processo produttivo si possa distinguere rispetto a uno storicamente affermato al fine di definire un'innovazione (Nardi, 1994).

Ambito di indagine

La digitalizzazione sta trasformando l'insieme delle relazioni che connettono le persone tra loro e con gli oggetti (IoT - *Internet of Things*, Kevin Ashton, 1999): le connessioni tra persone, cose e sistemi divengono sempre più articolati, diffusi e complessi e di tale rete si ha riscontro anche nel mondo della produzione, che si trasforma o si innova nei vari ambiti a seconda del modo in cui tali nuovi sistemi si affiancano o si sostituiscono a quelli precedenti. Ricerche nel campo dell'ingegneria, ma anche afferenti a settori quali quelli della biologia, della chimica e della medicina, stanno approfondendo questi temi per mettere a punto robot e tecnologie che, per l'insieme dei processi di lettura e risposta agli input, vengono detti "intelligenti" (Hunt, 1985).

È inevitabile che tali trasformazioni influenzino anche l'architettura e i suoi processi e, considerate le sperimentazioni in atto, è possibile affermare che la progettazione dell'architettura e la progettazione del processo costruttivo ad essa sotteso, saranno sempre più saldamente collegati, esplicitati e determinanti il valore del progetto (Nardi, 1994). La cultura materiale, intesa come la conoscenza e la comprensione dei materiali, si può avvalere oggi di numerose informazioni e del potenziale di nuove macchine. Le tecnologie che oggi abbiamo a disposizione ci consentono di accrescere tali conoscenze e, allo stesso tempo, di produrre nuove informazioni per ampliare le possibilità di intervento sui materiali, a partire dalla loro lavorazione per arrivare anche alla loro creazione (Nardi 1992), intervenendo sugli aspetti chimici e informatici.

Agli occhi dei non specialisti, l'innovazione promossa dalla digitalizzazione viene identificata con la figura del robot antropomorfo o del braccio robotico industriale e a questi viene associato un sentimento di timore, poiché le macchine stanno gradualmente sostituendo l'uomo in alcune mansioni lavorative (De Biase, 2015). Spesso anche chi opera nel settore edile si conforma a questa descrizione che, sebbene non del tutto sbagliata, è parziale e fondata sulla percezione delle difficoltà piuttosto che sulle opportunità che si offrono alla produzione e alla progettazione dell'architettura. Tale è il contesto in relazione al quale la presente ricerca indaga le modalità e le opportunità di impiego dell'automazione per lo sviluppo di architetture che prevedono un preminente utilizzo del legno a fini strutturali.

Motivazione della ricerca

La trasformazione del settore manifatturiero può incidere sulla progettazione architettonica e viceversa, così anche i progetti più innovativi influiscono profondamente e sono spesso le ragioni dell'innovazione delle tecniche di produzione degli elementi strutturali lignei. Per questo motivo i progettisti è bene che dispongano di strumenti utili a comprendere l'innovazione connaturata alla digitalizzazione e, nello specifico, all'automazione e alla robotica. Analogamente, è necessario che chi realizza carpenterie lignee conosca le potenzialità delle strumentazioni robotiche oggi disponibili e possa intrattenere un confronto con i tecnici del settore più competenti e idonei a definire quali macchinari siano adeguati alle nuove esigenze.

La consapevolezza delle potenzialità e la padronanza nell'uso delle tecnologie e degli strumenti a disposizione di progettisti e carpentieri sono alla base dello sviluppo progettuale, influiscono sulla rapidità con la quale il settore manifatturiero si evolve, hanno implicazioni sulla diffusione delle informazioni specialistiche attraverso settori disciplinari differenti: tutto ciò (e non solo questo) influenza il fare architettonico.

Una comunicazione non efficace, invece, può compromettere la qualità finale di un manufatto. Una carpenteria che non innova, al confronto con i *competitors*, può registrare un calo qualitativo o quantitativo della propria produzione; un progettista che non aggiorna il proprio lessico e le proprie conoscenze nel merito delle nuove lavorazioni materiali, nel momento in cui si relaziona con la rete dei soggetti coinvolti al fine dello sviluppo di un progetto, può interrompere o rallentare la comunicazione tra i soggetti inficiando il processo di produzione e costruzione o determinando la propria esclusione da esso. Questa forma di comunicazione inefficace deriva prima di tutto da una mancanza di informazioni e conoscenze: le motivazioni della presente ricerca si fondano sul desiderio di risolvere tale criticità e proporre strumenti utili a superare questa difficoltà, attraverso l'ideazione e lo sviluppo di strumenti specifici, quali un glossario, la mappa dei centri di ricerca, di enti di riferimento e professionisti che operano nel settore della carpenteria lignea e dell'architettura, oltre che all'individuazione di casi studio.

Obiettivo della ricerca

L'obiettivo della ricerca è quello di fornire strumenti utili ai progettisti e ai professionisti operanti nelle carpenterie. Data la definizione di differenti possibili interlocutori, è stata avviata un'indagine multidisciplinare legata alle discipline del progetto ma relazionata anche ad ambiti quali quello della robotica oltre che della carpenteria e della falegnameria. Tale indagine è stata svolta anche sul campo e i suoi limiti sono stati definiti nel corso della ricerca e vengono di seguito descritti.

Gli strumenti sviluppati rappresentano una parte dei risultati raggiunti durante la ricerca di dottorato:

- il glossario che descrive concetti, processi e termini, riferiti all'impiego dell'automazione nella carpenteria lignea in edilizia;
- i casi studio nei settori dell'architettura, della manifattura e della ricerca scientifica, che costituiscono esempi di impiego dell'automazione e dell'innovazione che ne deriva.

Questi strumenti accompagnano lo sviluppo delle riflessioni e delle teorizzazioni nel merito dell'automazione della carpenteria lignea e non vogliono fornire risposte e definizioni esaustive: la tesi riconosce che queste sono legate ai processi e ai prodotti che la digitalizzazione trasforma rapidamente e ridefinisce nell'impiego. La tesi ha l'obiettivo di offrire una fotografia ragionata di quanto sia oggi possibile realizzare in virtù di un progetto materiale e di un progetto architettonico che tengono conto dell'automazione della produzione degli elementi strutturali lignei.

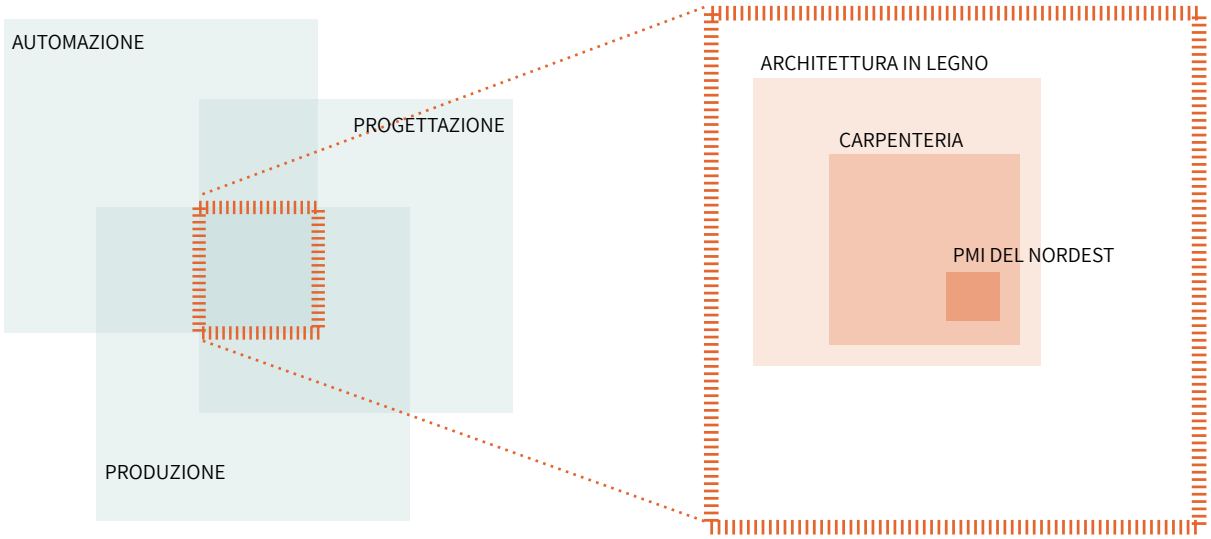
Ciò costituisce una sorta di "punto di partenza" che è utile ad aprire la progettazione e la produzione a nuovi futuri sviluppi e grazie al quale la tecnologia dell'architettura può cercare nuovi interlocutori per ampliare le conoscenze ad oggi disponibili e sviluppare le future innovazioni, per la promozione di uno sviluppo tecnologico consapevole della progettazione e della produzione anche al di fuori dello specifico caso studio dei componenti strutturali lignei e della realtà produttiva del Nordest.

Delimitazione del campo d'indagine

La ricerca approfondisce i temi dell'automazione, della produzione e della progettazione in riferimento allo specifico campo della realizzazione di elementi strutturali in legno: tali temi vengono portati al confronto con una specifica realtà produttiva, quella delle carpenterie con sede nel Nordest nelle provincie di Belluno, Bolzano, Gorizia, Padova, Pordenone, Rovigo, Trento, Treviso, Trieste, Udine, Venezia, Verona, Vicenza.

La presente ricerca è stata svolta osservando un ambito di indagine limitato ai temi dell'automazione, della progettazione e della produzione, come segue:

- in riferimento all'automazione, la tesi guarda all'impiego di strumenti quali CNC e robot per la modellazione materiale ed esclude l'impiego di strumenti per altre mansioni come ad esempio lo spostamento di elementi in cantiere. La robotica è intesa come l'insieme di macchinari impiegati nei processi di automazione e ne rappresenta la sua più alta forma di applicazione. Il termine robot quindi non si riferisce solamente al braccio



robotico, bensì a macchinari caratterizzati da numerosi gradi di libertà e capaci di svolgere un processo automatizzato;
- in riferimento alla progettazione, la tesi è rivolta a indagare i componenti strutturali, quali espressione "sincera" (Nervi, 1997) dell'architettura e capaci di definire uno spazio senza ulteriori sovrastrutture: è nella morfologia delle strutture e dei collegamenti che si manifesta la qualità di un'architettura;
- in riferimento al tema della produzione,la tesi descrive gli ambiti in cui la creazione e l'impiego di nuovi strumenti permettono di progettare la materia in maniera innovativa, con morfologie differenti, sia attraverso l'impiego di nuovi materiali e di quelli più noti.

L'automazione incontra la produzione offrendo macchine e robot in grado di movimentare ma anche e soprattutto di trasformare la materia attraverso tecnologie additive e sottrattive. La manifattura additiva consente un controllo pressoché totale della materia lavorata (è possibile governare la quantità di materia, gli spessori, la densità, ecc.), non è la stessa cosa nel caso di lavorazioni sottrattive, soprattutto qualora si intervenga su elementi naturali, come il legno. Il caso della manifattura sottrattiva risulta dunque più complesso, oltre ad essere centrale per la produzione di elementi strutturali lignei: le innovazioni relative all'automazione rispondono mettendo a punto strumenti che si possono considerare flessibili nella misura in cui sono in grado di adattarsi al materiale su cui vengono applicati.

Il legno, materiale storicamente impiegato in edilizia, rimanda a tradizioni locali, esempi e culture frutto del sedimentarsi di esperienze, innovazioni, influenze e sperimentazioni di lungo corso: i sistemi di automazione e di robotica si confrontano quindi con storiche tradizioni e contribuiscono a tracciare la storia futura di settori manifatturieri consolidati. La filiera della produzione e della lavorazione del legno è influenzata non solo dalla geografia, dalle condizioni climatiche e dalla cultura materiale locale, ma anche dalle politiche in grado di agevolare alcuni settori lavorativi piuttosto che altri.

La scelta di dedicare la ricerca al contesto italiano si può ricondurre principalmente a due motivi: il primo riguarda la ripresa nel settore edilizio, in partico-

lar modo nelle coperture, dell'impiego di elementi strutturali lignei; il secondo invece è relativo alla struttura economica del Paese, caratterizzata da piccole e medie imprese che mostrano da un lato importanti competenze artigianali e dall'altro alcune difficoltà a mantenersi aggiornate. L'area del Nordest, che comprende le regioni Friuli Venezia Giulia, Trentino Alto Adige e Veneto, costituisce un interessante contesto nel quale indagare gli effetti dell'innovazione legata alla robotica e all'automazione per la vicinanza con i territori d'oltralpe che si sono dimostrati essere i più attenti e attivi produttori di elementi strutturali lignei, ed è utile a comprendere come i progettisti si relazionino con questo settore manifatturiero che è in trasformazione.

Descrizione della metodologia

La tesi è stata redatta approfondendo gli aspetti teorici e quelli pratici dell'automazione, della progettazione e della produzione di elementi strutturali lignei. I capitoli centrali della tesi sono 4 e la loro successione è organizzata in modo tale da produrre un aumento progressivo della specificità dell'indagine, con l'obiettivo di identificare gli sviluppi futuri della tecnologia impiegata nel settore della carpenteria lignea.

Lo svolgimento della ricerca è stato scandito dalla successione di differenti attività e strumenti: ricerca bibliografica, visita in centri di ricerca, visita in aziende, partecipazione a fiere, partecipazione a convegni, che hanno portato allo sviluppo di una serie di "dialoghi", intrattenuti in forma diretta tramite interviste ad alcuni interlocutori d'eccellenza e in forma indiretta attraverso l'elaborazione del questionario, rivolto ai titolari delle carpenterie lignee con sede nel Nordest. La scelta degli strumenti è stata fatta in funzione degli ambiti di indagine e degli obiettivi parziali posti come ad esempio la necessità di raccogliere un numero ampio di dati o di individuare esperti del settore per porre loro specifiche questioni e domande.

La ricerca bibliografica è stata condotta a partire da una ricognizione dei testi rivolti ad indagare gli ambiti dell'automazione e della tecnologia dell'architettura e dedicati in modo particolare alla produzione, anche se non

CAP	Obiettivo parziale	Ambito	Attività
1	Interpretare i significati e le implicazioni dell'automazione: il settore produttivo.	Industria e settore manifatturiero	Visita in azienda Intervista: prof. Federico Butera Conferenza: t2i – Treviso tecnologia
		Ricerca su robotica e automazione per l'industria	Visita di FABLAB (Poplab, FABLAB Vega) Intervista: prof. Stefano Micelli Intervista: prof. Stefano Menegatti
2	Prefigurare l'impiego dell'automazione nei processi dell'architettura, in particolare quello rivolto alla produzione di componenti edili.	Ricerca sull'impiego dell'automazione in architettura	Visita ACTLAB Milano Conferenza: FABRICATE 2017, Stoccarda Conferenza REBUILD 2017, Trento Conferenza Fabio Gramazio, Milano Corso di programmazione CNC per lavorazione materiale Intervista: arch. Leonidas Paterakis Intervista: arch. Valentina Temporin Intervista: prof.ssa Ingrid Paoletti Intervista: prof. ing. Thomas Bock
3	Attraverso l'analisi di una serie di casi studio, si ricercano le connessioni tra il saper fare storico e le innovazioni introdotte attraverso l'impiego dei robot e dell'automazione	Ricerca sull'architettura e i componenti strutturali lignei	Intervista: prof. Franco Laner Intervista: prof. Felice Ragazzo
		Manifattura lignea e carpenterie	Conferenza AEDIFICA 2018, Vicenza Fiera XYLEXPO 2018, Milano Intervista: arch. Andrea Zambon Intervista: arch. Carlo Capovilla (VE) Fiera BIMU 2018, Milano
4	Il capitolo confronta le informazioni e le stime in merito all'impiego di robot nel comparto della carpenteria lignea nell'area del Triveneto	Carpenterie e falegnamerie del Triveneto	Visita azienda LIGNOALP Visita azienda Zanella Vista azienda De Pol Intervista: Walter Capovilla (BZ) Intervista: Alfio Zanella Questionario (per costruzione questionario si fa riferimento al capitolo 4)

Tab. 01. Le principali attività svolte in funzione degli ambiti di indagine e degli obiettivi parziali posti.

esplicitamente riferiti a quella di elementi strutturali lignei. Sono stati individuati i primi manuali di robotica ed automazione editi a livello mondiale che, confrontati con le pubblicazioni scientifiche più recenti, hanno contribuito alla messa a punto del glossario. Sono stati raccolti e studiati *paper* scientifici e atti di convegno per individuare gli sviluppi più avanzati della ricerca, soprattutto in riferimento all'applicazione della robotica in architettura. Queste attività sono state fondamentali per lo sviluppo dei capitoli 1 e 2 della tesi, utili a definire l'automazione in edilizia.

Accanto alla ricerca bibliografica sono state condotte visite in aziende, partecipazioni a convegni e visite in fiere specializzate: ciò al fine di raccogliere informazioni aggiornate e considerazioni da parte di tecnici ed esperti in merito ai possibili sviluppi dell'automazione rivolta all'ambito della progettazione di architetture lignee.

È stata avviata una serie di dialoghi, in forma diretta attraverso lo strumento dell'intervista e in forma indiretta attraverso l'elaborazione e la proposizione di un questionario. L'indagine relativa alle carpenterie e alle falegnamerie del Nordest (capitolo 4 "La trasformazione della carpenteria lignea: il caso del Nordest") ha richiesto la messa a punto di una propria specifica metodologia di indagine: l'obiettivo di indagare una realtà produttiva di uno specifico territorio è stato perseguito attraverso la raccolta di una molteplicità di informazioni, talvolta anche tra loro contrastanti. A tal fine è stato elaborato e inviato un questionario a un campione selezionato di aziende: la definizione del campo d'indagine, del campione, il questionario e le attività correlate a questa fase, sono descritti nel capitolo quattro. Inoltre nel corpo della tesi sono riportati alcuni stralci delle interviste che costituiscono parte integrante dell'argomentazione: la scelta di riportare tali dialoghi deriva dalla volontà di ricercare ed esplicitare una forma di indagine dinamica, capace di evolvere in funzione delle informazioni che si raccolgono in corso d'opera grazie al contributo di professionisti afferenti ad ambiti differenti.

Nella tabella 01 sono esplicitati strumenti di ricerca in relazione al capitolo della tesi in cui essi sono stati riportati e per il quale hanno costituito un supporto determinante l'avanzamento del lavoro.

capitolo uno

L’automazione e i robot

capitolo uno

L’automazione e i robot

Nel 1952 venne pubblicato il libro “Automation: the advent of the automatic factory” di J. T. Diebold e rappresentò un contributo alla diffusione del termine “automazione”. Inizialmente la parola descriveva solo i processi organizzati per la gestione di dati informatici. Nel corso dei decenni il significato del termine si estese ad altre tipologie di processo, supportate da differenti elaboratori e macchine: tra queste macchine, anche quella oggi nota con il nome di robot. La disciplina che ne deriva, la robotica, costituisce dunque solamente una parte dell’automazione, la quale si estende dalla gestione ed elaborazione di dati informatici, fino alla movimentazione di parti meccaniche.
L’analisi dell’automazione e della robotica consente di mettere a sistema le peculiarità e le differenze dei due ambiti di studio, ne descrive i limiti e le prospettive di sviluppo in relazioni ai differenti campi di applicazione: automazione e robotica non sono discipline che si identificano l’una con l’altra, ma che si integrano a vicenda.
Il capitolo descrive i significati e gli usi dell’automazione e della robotica attraverso una serie di riferimenti storici, dalle prime sperimentazioni di automi fino alle tendenze di sviluppo dichiarate dagli odierni produttori di robot. Attraverso lo studio di questa evoluzione è possibile descrivere alcuni principali fattori caratterizzanti le macchine robotiche, come la morfologia e la meccanica, i settori d’impiego, i gradi di libertà, i gradi di autonomia: sulla base di questi è stata costruita una classificazione degli impieghi della robotica con particolare riferimento all’architettura.

L'uomo da sempre sviluppa tecnologie allo scopo di facilitare lo svolgimento di lavori pesanti come il trasporto di materia o complessi come i calcoli matematici. In questo filone di ricerche si colloca anche lo studio dell'automazione: il termine ha origine dall'inglese *automation*, deriva dalla crasi tra parole "operazione" e "automatica" (*autom*-atica oper-*azione*) ed è stato inizialmente utilizzato per indicare, genericamente, ogni processo organizzato. L'origine del termine viene attribuita allo statunitense John T. Diebold (1926-2005), autore di *Automation: the advent of the automatic factory* (Van Nostrand, 1952), libro in cui l'autore raccoglie le ricerche che ha condotto durante gli anni di studio presso la Harvard Business School. Diebold è stato consulente finanziario di numerose aziende e ha contribuito a diffondere l'impiego di sistemi programmabili all'interno di operazioni commerciali: il termine "automazione" si slega così da operazioni meccaniche come quelle industriali e fa riferimento a processi complessi, come l'archiviazione e lo scambio di dati all'interno di una società.

La Seconda Guerra Mondiale e il dopoguerra sono anni in cui la ricerca nei campi della matematica applicata e dell'informatica cresce, ciò grazie anche alle nascenti industrie delle telecomunicazioni e dell'elettronica. Anche la ricerca condotta nelle accademie e nelle università sviluppa studi e, in questo ambito, il matematico inglese Samuel Lilley[1] (1914-1987) diviene il massimo esperto di macchine a controllo numerico; noto per il suo articolo *Mathematical Machines* pubblicato su Nature nel 1942 e dedicato all'evoluzione delle macchine utensili, egli contribuisce allo sviluppo e alla definizione dell'automazione, proprio negli anni in cui il termine inizia a trovare diffusione. Nel 1957 Lilley pubblica *Automation and social progress*[2] (tradotto in italiano nel 1962) in cui parla de "l'introduzione o l'uso di macchinari e di procedimenti altamente automatici che eliminano in larga misura il lavoro umano ed il circostanziale controllo umano" (Lilley, 1962). È proprio quest'ultima affermazione, il circostanziale controllo umano, che contraddistingue l'automazione rispetto a quanto sostenuto da Diebold, e che rafforza ancora di più la distinzione dell'automazione dagli altri processi dell'*automatizzazione* e della *meccanizzazione*. L'automatizzazione infatti fa riferimento a una specifica operazione o lavorazione che viene eseguita in maniera automatica; la meccanizzazione invece si riferisce alla capacità di trasferire un gesto lavorativo umano a uno meccanico di una macchina utensile, tendenzialmente in maniera ripetitiva.

L'automazione è quindi propria di un ciclo operativo complesso e soprattutto capace di autoregolarsi attraverso il riconoscimento di impulsi esterni, i cosiddetti *feedback* (Rovetta, 1990). La capacità di autoregolazione può essere confusa con l'intelligenza artificiale, tuttavia sono due competenze differenti: l'autoregolazione, propria di una macchina utensile ad esempio, è la capacità di riconoscere la strategia più opportuna per raggiungere un obiettivo, nel limite dei parametri preimpostati sulla macchina; l'intelligenza artificiale invece è caratterizzata dalla memoria dei *feedback* passati e dalla capacità di calcolo e rielaborazione dei dati accumulati, questo processo assomiglia per alcuni versi dalla capacità di apprendimento di un essere umano e consente alla macchina di compiere lavorazioni in virtù di una forma di autoregolazione che è potenzialmente espandibile, di lavorazione in lavorazione perché la macchina è in grado di acquisire e implementare il proprio archivio di dati acquisiti e prodotti attraverso i *feedback*, che sono paragonabili a vere e proprie esperienze.

L'automazione può essere considerata una fase dello sviluppo industriale. Essa è frutto della tecnica ed è al servizio del lavoro dell'uomo; è il risultato di un processo complesso nel quale differenti discipline hanno contribuito a trasformare il significato stesso di automazione, tra queste:

- la meccatronica, cioè la disciplina che fa interagire la meccanica, l'elettronica e l'informatica, monitora l'evoluzione degli strumenti impiegati per la lavorazione materiale, il trasporto, il controllo, ecc.; infatti, oltre, alla componente meccanica degli strumenti, è importante descriverne anche l'elettronica e l'informatica, che rendono lo strumento autonomo dal comando umano e capace di raccogliere dati e di elaborarli;
- l'*Internet of Things* (IoT), cioè la capacità di connettere sul piano digitale dati e informazioni, è molto utile per raccogliere informazioni, elaborare modelli previsionali e monitorare costantemente gli specifici parametri sui quali calibrare il comportamento degli strumenti operativi grazie all'automazione.

La ricerca dell'automazione ha alle spalle una lunga storia che si sviluppa attraverso l'evoluzione di automatismi, la costruzione di macchine e automi, fino ad arrivare all'elaborazione dei primi prototipi di robot del Novecento. Nell'antico Egitto la tecnologia affrontava la costruzione di sistemi automatici capaci di regolarsi con le condizioni esterne: un esempio è la statua di Memnone, re di Etiopia del XV secolo A.C., capace di emettere suoni quando la statua era colpita da raggi solari e si scaldava. Athanasius Kircher (1602-1680), storico e filosofo esperto delle culture orientali, in *Oedipus Aegyptiacus*[3], una delle sue opere più famose, descrive il funzionamento della statua ipotizzando un sistema idraulico che si azionava con il calore del sole e che era in grado di riprodurre determinati suoni attraverso la pressione del vapore[4]. Non esistono prove reali utili a confutare o a confermare l'affermazione di Kircher[5] e la statua di Memnone costituisce tutt'oggi uno dei meccanismi più antichi di automatizzazione, il primo di una lunga serie: gli esempi si rifanno principalmente a tre campi d'applicazione (bellico, produttivo e intrattenimento) e i movimenti erano azionati dall'acqua, dal calore e, successivamente, anche da sistemi a molla. Erone di Alessandria, matematico del I secolo d.C., esperto di geometria e meccanica, è l'inventore di numerosi strumenti azionabili mediante pressione: *Pneumatica* (fig. 01) riporta la descrizione di queste macchine, e insieme agli altri suoi scritti *Belopoeica* e *Automata*, costituisce una delle più importanti raccolte dell'antichità su questi temi (Santos, 1989). I trattati furono oggetto di studio nel Cinquecento e furono



01. Estratto dalla seconda edizione italiana, 1592, dell'opera principale, Pneumatica (a cura di Erone d'Alessandria) ideatore di numerose invenzioni tra cui l'eolipila, la prima macchina a vapore della storia. L'immagine riporta un gioco meccanico, il cui movimento è attivato dal vapore.

tradotti in latino e in italiano, contribuendo così a diffondere gli antichi studi e le prime applicazioni di sistemi automatici. Tra i sistemi automatici più conosciuti tra quelli ideati da Erone, vi è il teatro che raccoglie una serie di intuizioni e soluzioni meccaniche in grado di proporre una scena della durata di circa 10 minuti, animata grazie all'impiego di ingranaggi e ruote dentate[6].

Nei secoli successivi e per quasi l'intero Medioevo, sono state realizzate altre opere che possono essere ricondotte alla ricerca dell'automazione, tuttavia si tratta di macchine talvolta frutto di mistificazione e magia, appartenenti al regno dell'incerto (Portoghesi, 2014, p.175) e delle quali non esistono, al di fuori di testi e racconti, delle prove certe della loro esistenza e dei loro meccanismi di funzionamento.

1.1 Automatismo e automa

Il Rinascimento costituisce un periodo in cui la ricerca dell'automazione trova rinnovato interesse, soprattutto in riferimento alla meccanica e alla geometria, quindi a quell'idea di *automa* come macchina capace di operare in modo autonomo. Le ricerche in questo ambito e le sperimentazioni in nuove macchine sono da ricondursi anche allo studio e alla traduzione in latino di alcuni trattati dei secoli precedenti, tra i quali anche quelli sopracitati di Erone di Alessandria. Già in questa epoca, l'automa è prima di tutto una macchina autonoma e non necessariamente una macchina antropomorfa o zoomorfa: le caratteristiche relative a questo aspetto dell'automa sono di norma definite in funzione degli scopi e degli ambiti per il quale l'automa viene progettato.

Non è raro che gli inventori applichino al campo artistico i sistemi automatici per accrescere l'effetto spettacolare: è il caso di Filippo Brunelleschi e dell'allestimento realizzato nel 1439 in occasione della Festa dell'Annunziata a San Felice in Piazza a Firenze (Rovetta, 1990). Egli infatti realizza una rappresentazione teatrale in cui la scenografia e le figure si muovono simultaneamente e automaticamente: queste soluzioni sono risultato degli studi sviluppati dal progettista e delle applicazioni nei cantieri; Brunelleschi progettò infatti molti macchinari utili alla movimentazione di materiale, dal settore bellico a quello edile (Kieran e Timberlake, 2004).

Nel successivo secolo dei Lumi, la macchina intesa come sistema complesso capace di compiere un lavoro (un'azione) diviene oggetto di numerosi studi: che essa fosse impiegata per la realizzazione di automi dedicati al mondo dello spettacolo o per lo sviluppo di macchine utensili nel settore manifatturiero, la macchina rappresenta la matematizzazione del gesto umano (Picon, 1988). Attraverso la geometria vengono scomposti i movimenti umani, ogni gesto viene tradotto in movimento e la meccanica tenta la riproduzione di questo attraverso più o meno elaborati meccanismi, i cui ingranaggi muovevano utensili e strumenti. La meccanizzazione dei movimenti viene inizialmente affrontata attraverso l'impiego di sistemi a molla con scappamento[7] (Rovetta, 1990), dato che ancora non erano conosciute o diffuse le fonti energetiche fossili e a vapore, che troveranno ampia applicazione a partire dal Settecento e che definiranno il successo di tutte le macchine.

Se da un lato la meccanizzazione coinvolge i processi della produzione, la progettazione di automi non riguarda solo gli studiosi della meccanica ma ha trovato una diffusa sperimentazione e ha coinvolto numerose altre discipline quali scienza e filosofia. È nell'Illuminismo che la meccanica, intesa come lo studio del movimento dei corpi, si avvicina quanto più possibile all'uomo, con l'obiettivo di riprodurne sembianze e gesti: "Il breve componimento poetico premesso a un *Libro di arithmetica e geometria* di Feliciano, scritto nel 1560, a dispetto delle elucubrazioni astratte dei matematici, promette al lettore un pragmatismo assolutamente spontaneo. […] Come già preannunciato nel taccuino di Villard de Honnecourt[8], la geometria e più in generale lo schematismo della matematica, diviene linguaggio, strumento, ma soprattutto schema mentale per rappresentare una realtà artificiale che ha bisogno di regole per sussistere e per essere duplicata e moltiplicata" (Marchis, 1994, p. 104). Le scienze matematiche diventano quindi le discipline attraverso le quali studiare e riprodurre l'uomo, in una nuova realtà artificiale in cui l'azione umana non è indispensabile poiché in questa realtà le macchine sono autonome.

Nel 1700 gli automi sono dotati di complessi meccanismi e sono realizzati soprattutto come opere di intrattenimento: tra i più celebri[9], si ricorda il suonatore di flauto (1738) di Jacques de Vaucanson (1709-1782) che riproduce una melodia sonora tramite un complesso sistema di valvole. L'ingegno con il quale vengono progettati sistemi così complessi, riflette lo stato di una società in forte trasformazione non solo dal punto di vista culturale ma anche economico: "Il meccanismo automatico, il sistema di regolazione, la meccanica dei controlli e della automazione si fanno sempre più strada nella tecnica dell'Ottocento. Le industrie meccaniche ed elettrotecniche, le società di estrazione dei minerali e di produzione dell'energia assorbono denaro, mano d'opera e strappano all'agricoltura ampi settori di strati sociali" (Rovetta, 1990, p. 36).

La diffusione culturale della meccanizzazione degli strumenti è supportata dalla stampa, che ha contribuito a diffondere la letteratura tecnica: le prime pubblicazioni di manuali illustrati con contenuti testuali affiancati ad immagini, risalgono al Cinquecento. Questa forma di comunicazione agevola la descrizione di strumenti e macchine da lavoro: il fondatore di questo genere letterario è considerato Jacques Besson (Marchis, 1994), autore di *Theatrum Instrumentorum et Machinarum* (Lione, 1569) (fig. 02), ma è a partire dal 1700 che si conta un gran numero di pubblicazioni simili, più o meno specializzate[10], che contribuiscono a porre le basi per le così dette "arti meccaniche", descritte poi nel *Dizionario ragionato delle scienze, delle arti e dei mestieri*[11] (1745) di Denis Diderot


THEATRVM
INSTRVMENTO
RVM ET MACHI-
narum Iacobi Bessoni
Delphinatis, Mathe-
matici ingeniosissimi,
NEGNON VSIQVE NE
LVGDVNI
Apud Barth. Vincent.
Cum Priuilegio Regis.
1582.

02. Theatrum instrumentorum et machinarum Iacobi Bessoni Delphinatis, Jacques Besson, Leiden 1582. British Library, CC0

e Jean-Baptiste Le Rond D'Alambert. Con la diffusione della letteratura tecnica, la macchina viene definita come sistema complesso composto da più parti mosse "sotto l'impulso di una forza motrice semplice, [capace di eseguire] i movimenti composti di un'operazione tecnica precedentemente realizzata da una o più persone" (Mantoux, 1971). Se il termine *utensile* indica uno strumento adatto a una specifica lavorazione, la macchina utensile non è altro che la sua evoluzione: si tratta di uno strumento più complesso che si distingue dal semplice utensile perché capace di sfruttare una fonte energetica differente da quella umana e riprodurre un gesto in maniera automatica (e non automatizzata). L'energia dell'uomo viene impiegata per azionare altri meccanismi della macchina utensile, utili al ciclo complessivo di lavorazione, ma l'azione vera e propria di lavorazione della materia viene attivata da fonti energetiche differenti, inizialmente da fonti idrauliche o a vapore, e dall'elettricità a partire dall'Ottocento.

1.2 L'automa e la macchina

Le macchine utensili azionate dalla forza dell'uomo o dalla forza animale subiscono una forte trasformazione a partire dal Seicento grazie l'impiego di fonti energetiche differenti, come quella dell'acqua o, nel Settecento, del vapore. Lo sviluppo della meccanica muta gradualmente gli strumenti del lavoro e, assieme all'introduzione di nuove fonti energetiche, rivoluziona il lavoro umano: la persona è coinvolta meno nell'azione lavorativa perché questa viene praticata dalla macchina utensile e quindi alla persona viene richiesto uno sforzo fisico minore. Il "gesto delocalizzato" (Picon, 1988) viene riprodotto in maniera automatica e si iniziano a realizzare macchine utensili specializzate per alcune lavorazioni, capaci cioè di riprodurre il gesto per la movimentazione dell'utensile senza la necessaria presenza dell'essere umano.

Nella prima fase di evoluzione industriale si introduce il concetto di "geografia delle macchine" (Marchis, 1994) poiché la loro costruzione è strettamente connessa alle caratteristiche del territorio[12]: esse sono il risultato di uno sviluppo tecnologico territoriale, dato dalla disponibilità delle risorse energetiche e anche dalle competenze locali. Le prime fabbriche[13] diventano presto dei centri di alta produzione, in cui l'energia e la meccanizzazione contribuiscono ad accrescere la produttività, in termini di numero più che di qualità: quest'ultima resta ancora affidata al gesto umano e non a quello delocalizzato della macchina. Sebbene oggi il termine manifattura indichi una lavorazione eseguita tramite mano o macchina, fra il 1760 e il 1780 si riferiva ad una produzione differente da quella industriale (che era effettuata in fabbrica) e descriveva una produzione fatta a mano e di qualità superiore (Marchis, 1994).

Il gran numero di macchine ideate durante l'Illuminismo trova perfezionamento a partire dalla seconda metà dell'Ottocento, sia dal punto di vista meccanico della struttura della macchina, sia nel caso della tipologia di utensile per la lavorazione, con un conseguente miglioramento nella precisione dell'operazione. In questo contesto, Robert Willis con *Principles of Mechanism* (Cambridge, 1841) introduce il concetto di modularità e di produzione in serie, poiché gli stessi ingranaggi delle macchine utensili erano prodotti da altrettante macchine utensili e quindi il processo di automazione si poteva considerare integrato a più livelli, nell'attività produttiva e industriale. A partire dal 1850 il parco macchine si amplia, ciascuna è dedicata ad una propria lavorazione specifica e viene azionata attraverso un processo

sempre più automatico[14] (Galloway, 1965). Parallelamente allo sviluppo tecnologico, si assiste all'unificazione dei criteri di produzione uniformando unità di misura e dimensione degli elementi: in questo modo ogni macchina utensile poteva essere assemblata con componenti prodotti anche in differenti officine e non più necessariamente in un'unica fabbrica. Successivamente alcune officine si specializzano nella realizzazione di parti e componenti per macchine utensili. La produzione in serie, industriale, inizia proprio con la produzione di componenti per costruire altre macchine capaci, a loro volta, di produrre parti di macchine o prodotti di consumo; questa forma di produzione aumenta progressivamente di precisione e di dettaglio, e tali caratteristiche si trasferiscono al prodotto finale rivolto all'utente e realizzato grazie all'impiego di utensili più precisi e performanti (Wilson, 1965). Tra le prime macchine che hanno inciso nello sviluppo della lavorazione automatica, si ricorda il tornio automatico progettato da C.M. Spencer attorno al 1865 per la produzione di viti[15] o la fresatrice di J.R. Brown realizzata nel 1862.

Eventi come le guerre incisero molto sullo sviluppo delle macchine utensili in quanto riducevano la quantità di manodopera disponibile, perché gli uomini erano impegnati al fronte, e al contempo aumentava la richiesta di prodotti bellici. La macchina automatica si rese quindi indispensabile per risolvere tali problemi tuttavia la tendenza nello sviluppo delle linee di produzione non si volse all'impiego di quante più macchine automatiche possibili, ma piuttosto cercava di rendere l'intero processo produttivo "automatico" e automatizzato.

Nel 1861 l'ingegnere scozzese William Fairbairn (1789-1874), in occasione del discorso inaugurale della British Association[16] di cui era il presidente, elogia il ruolo delle macchine e soprattutto la capacità degli uomini che le sanno progettare e produrre. Egli sostiene che la macchina automatica abbia raggiunto ormai una capacità che la mano umana non potrebbe eguagliare e riconosce a questa una competenza "quasi creativa", al punto tale da essere paragonata a un automa[17]. L'automa era considerato la massima espressione degli studi volti all'imitazione dell'essere umano (non solo nella forma, ma anche nei movimenti) e quindi è chiaro che Fairbairn stesse annunciando un importante obiettivo per la progettazione delle macchine: egli prevedeva lo sviluppo non solo di macchine in grado di ripetere automaticamente un gesto lavorativo, ma anche di governare processi più complessi. Egli immagina veri e propri sistemi di automazione analoghi a quelli che verranno definiti solo negli anni Quaranta del Novecento, quasi 100 anni dopo, quando il termine "automazione" verrà utilizzato in riferimento ai processi industriali.

1.3 La macchina e il robot

L'estensione e lo sviluppo dell'automazione nella prima metà del Novecento sono grandemente debitori nei confronti dell'elettronica (Lilley, 1957), la quale ha contribuito a integrare circuiti elettronici alle varie parti di una macchina utensile, che diviene così capace di muoversi (e di produrre) rispondendo a *feedback* e che quindi è in grado di reagire a degli stimoli.

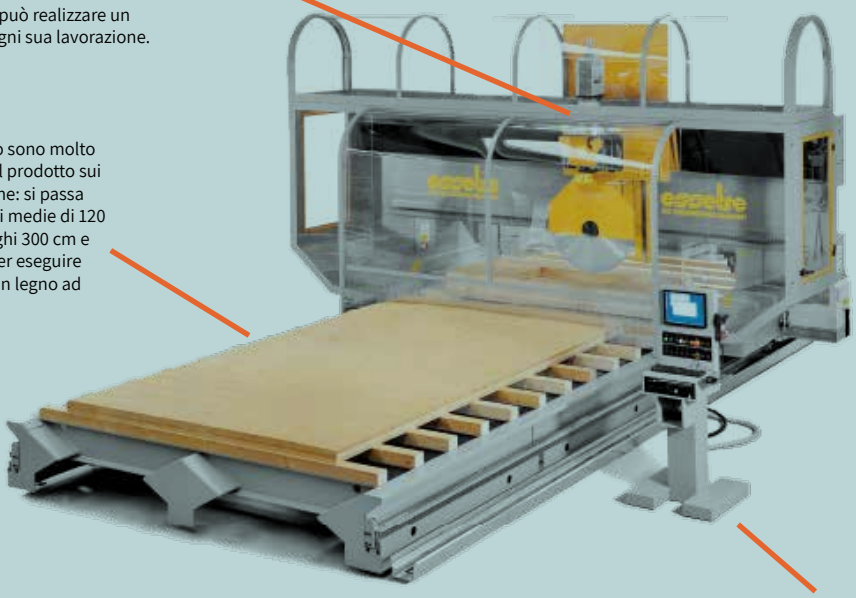
L'automazione diviene quindi un processo sempre più flessibile, ovvero un processo in cui le dinamiche possono mutare ma l'obiettivo finale viene comunque raggiunto perché il processo è in grado di autoregolarsi. L'automazione, tuttavia, non va confusa con la robotica: la robotica costituisce un settore dell'automazione e si riferisce a una tipologia di strumentazione caratterizzata da differenti gradi di libertà e dalla flessibilità di tipologie di lavorazione (Ro-

MAGAZZINO UTENSILI
Rappresenta il deposito degli utensili per eseguire le lavorazioni: il mandrino accede a questa zona per cambiare il proprio utensile. Il magazzino può essere mobile o fisso, ed è conosciuto come ATC – Automatic Tool Changer. Obiettivo dell'ATC è ridurre al minimo i tempi di cambio.
Se la macchina dispone di un magazzino utensili, si può definire tale strumento anche come centro di taglio e può realizzare un prodotto completo in ogni sua lavorazione.

PORTALE O CAVALLETTO
Costituisce il sistema per la movimentazione del mandrino e contribuisce quindi ad accrescere i suoi gradi di libertà: su questo può essere installato anche il magazzino degli utensili. Il cavalletto può muoversi lungo l'asse X, l'asse cioè del piano di lavoro, lungo l'asse y ciè l'asse dei binari, oppure restare fisso. In tal caso sarà un nastro a muovere il prodotto su cui eseguire la lavorazione, come ad esempio fresature su elementi lineari, come travi in legno.

MANDRINO
È il dispositivo su cui viene installato l'utensile da lavoro: il mandrino può eseguire movimentazioni lungo differenti assi, che determinano a loro volta i gradi di libertà di una macchina. Maggiori sono i gradi, maggiori saranno quindi le tipologie di lavorazione che si potranno eseguire: le CNC base dispongono di 3 assi (X,Y,Z) e consentono quindi di lavorare su altezza, larghezza e profondità; le macchine possono raggiungere fino a 12 assi, integrando operazioni in cui il mandrino assume inclinazioni differenti.

PIANO DI LAVORO
Le dimensioni del piano sono molto variabili, in funzione del prodotto sui cui si esegue l'operazione: si passa da piani con dimensioni medie di 120 cm x180 cm, a piani larghi 300 cm e lunghi anche 900 cm, per eseguire lavorazioni su pannelli in legno ad esempio.



HARDWARE
L'hardware rappresenta l'unità che coordina le operazioni della macchina e gestisce l'intero funzionamento dello strumento.
Questa parte è realizzata tramite schede e microprocessori, le cui dimensioni nel corso degli anni si sono ridotte sempre più grazie al progresso tecnologico che ha permesso di ottimizzare lo spazio di ingombro. L'hardware è sempre presente nella macchina CNC.

L'immagine rappresenta lo schema di una macchina CNC: quanto indicato infatti può essere installato all'interno della macchina in maniera e posizioni differenti.

LA MACCHINA CNC

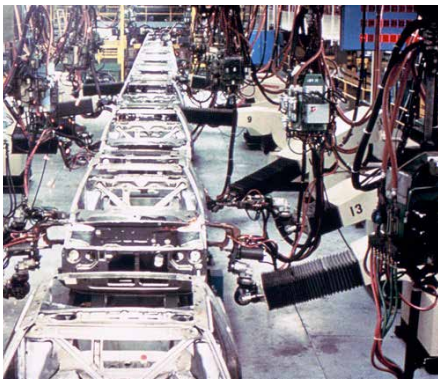
La macchina CNC è una macchina a controllo numerico (Computer Numerical Control) ed è considerata come l'evoluzione delle macchine utensile, macchine cioè che riproducono meccanicamente un gesto lavorativo, attraverso l'impiego di forza motrice animale o di altra natura (acqua, vapore, fino a energia elettrica).
Le macchine CNC devono il proprio sviluppo all'impiego dell'informatica, utilizzata per integrare alla macchina utensile un software attraverso il quale l'operatore può fornire istruzione per le operazioni da eseguire, tramite un linguaggio matematico.
Le prime macchine a controllo numerico furono sviluppate nel contesto aeronautico per supportare la produzione di superfici curve complesse. La macchina CNC è stata infatti realizzata con l'obiettivo di effettuare una lavorazione in cui l'utensile potesse muoversi contemporaneamente su più assi (X, Y, Z).
Con macchina CNC non si intende uno specifico strumento, ma una categoria di macchinari, basati sull'impiego di un software CAM (Computer Aided Manufacturing) in grado di muovere un utensile fisso o intercambiabile, su differenti assi, che costituiscono i gradi di libertà di una macchina. Una macchina CNC può eseguire differenti lavorazioni e ciascuna di esse richiede strumenti appositi: la fresatura, la tornitura, la foratura sono le lavorazioni più diffuse ma si ricordano anche il taglio laser, taglio filo a caldo, getto d'acqua.
La macchina CNC è uno strumento adatto alla manifattura sottrattiva, quindi esegue lavorazioni per l'asportazione di materiale e può essere impiegata per diversi materiali solidi, come metallo, legno, plastica, polistirolo EPS, polistirolo XPS, pietra. Ciascuno di questi materiali richiede oltre a specifici utensili, anche motori differenti, perché occorre utilizzare forze ed energie appropriate e soprattutto un piano di lavorazione variabile in funzione del materiale grezzo su cui eseguire l'operazione.
Attraverso il software viene elaborata la lavorazione da eseguire, l'impiego di uno o più utensili e il percorso che ciascuno deve eseguire: la macchina CNC consente di eseguire una lavorazione che può richiedere anche tempi molto lunghi, con continuità e senza interruzioni, senza interagire con l'uomo. Quando la macchina CNC è in grado di utilizzare più utensili e quindi di eseguire una moltitudine di lavorazioni su un unico pezzo, si definisce anche centro di lavoro.

vetta, 1990). L'automazione invece non è in alcun modo riferita agli strumenti ma viene definita in relazione ai differenti ambiti in cui trova impiego, dai servizi pubblici a quelli di sicurezza, dalla gestione aziendale ai singoli processi produttivi. Per questo motivo l'automazione impiega differenti strumenti: ciò è evidente soprattutto osservando le filiere produttive in cui l'automazione ha contribuito a ridefinire il processo, dalle fasi di lavoro come il trasporto del materiale o la sua lavorazione, fino al grado di intervento dell'essere umano, coinvolto in maniera sempre più indiretta nella lavorazione materiale.

Nel settore produttivo l'automazione si diffonde attraverso lo sviluppo di macchine *transfer* e macchine a controllo numerico (CNC *Computer Numerical Control*), come progresso tecnologico delle macchine utensili già in uso. I primi modelli di macchine *transfer* sono organizzati lungo una linea di produzione e lavorano su prodotti che si spostano autonomamente: si tratta di un sistema applicato soprattutto a linee di produzione in serie che realizzano numeri molto alti di prodotti. Grazie all'integrazione con l'informatica, e soprattutto con l'impiego della sensoristica, si sviluppano nuove forme di automazione e vengono realizzate le prime macchine CNC: sono le "macchine a programma controllato, [cioè] macchine fornite di intelligenza sufficiente per leggere una serie di istruzioni […] e per tradurre queste istruzioni in azione, in un tempo assai minore di quello che occorre a un operaio per leggere un diagramma cianografato e per controllare l'esattezza delle operazioni compiute" (Lilley, 1957). Successivamente, vengono installati i primi hardware e le macchine[18] divengono capaci di elaborare azioni in funzione dei *feedback* che i sensori acquisiscono: in questo caso la flessibilità e la programmabilità della lavorazione riguardano la macchina stessa e non solo la sua posizione all'interno della linea di produzione.

A partire dagli anni Sessanta viene adottata nelle di produzione anche la robotica, in particolar modo il braccio robotico, una tipologia di strumento molto flessibile adatto a svolgere un'ampia varietà di lavorazioni. Il primo robot utilizzato nella produzione industriale è stato progettato dalla Unimation Inc e installato nel 1961 nell'impianto della General Motors (fig. 03) per eseguire operazioni di pressofusione del metallo, operazioni pericolose per la salute dell'uomo[19] (Isidori, 1986). In seguito vengono sviluppati numerosi robot, sempre sottoforma di bracci antropomorfi, in grado di svolgere lavorazioni precedentemente affidate dall'uomo, specialmente nel campo automobilistico, settore già fortemente segnato da sistemi di automazione[20].

L'impiego della robotica nell'industria ha tratto origine dalle figure introdotte e diffuse nell'immaginario comune attraverso la letteratura. Lo stesso termine "robot" conosce una prima ampia diffusione a partire dalla stampa de *I robot universali di Rossum*[21], una commedia fantascientifica del 1920 firmata da Karel Čapek (1890-1938) in cui i robot sono organismi simili agli uomini e sono geneticamente modificati per svolgere le attività lavorative più pesanti: il loro nome deriva dalla parola ceca *robota*, che significa lavoro forzato[22]. Un importante contributo allo sviluppo e alla diffusione del robot, inteso come macchina artificiale realizzato in somiglianza dell'uomo, va riconosciuto al biochimico e scrittore Isaac Asimov (1920-1992), autore di numerosi racconti fantascientifici, ma noto soprattutto per la raccolta *Io, robot*[23], che contiene nove racconti ambientati nel 2050: il *file rouge* di tutti i racconti è la "robopsicologa" Susan Calvin, esperta dei "comportamenti" dei robot che sembrano dominati da tratti caratteriali umani. Asimov associa al robot una figura umanoide con una forte connotazione metallica, per esaltare maggiormente il carattere di macchina in-



03. Unimate è il primo robot industriale, utilizzato dalla General Motors nello stabilimento di Ewing Township (New Jersey), nel 1961. Unimate esegue operazioni di pressofusione all'interno della catena di montaggio e salda le parti lavorate sui corpi delle autovetture. Nel 1969 viene General Motors realizza la prima catena di assemblaggio completamente automatizzata (in foto). International Federation of Robotics



AVAMBRACCIO O SECONDO BRACCIO
Costituisce il secondo segmento rigido del sistema del braccio robotico. Il numero di elementi rigidi può essere superiore a due, in funzione dell'applicazione e della lavorazione che il braccio robotico deve eseguire.

END EFFECTOR
Costituisce l'estremità libera del braccio robotico, il punto di contatto con il prodotto da modellare o spostare. L'end effector rappresenta l'utensile installato, che può variare a seconda

GOMITO
È il giunto rotoidale tra i due bracci, o tra il braccio e l'avambraccio, il cui movimento è definitivo come "estensione del gomito"

POLSO
È il giunto più articolato del braccio robotico che collega il braccio con l'end effector. Questo giunto infatti consente tre specifici movimenti rispetto l'asse dell'end effector: il beccheggio la rotazione attorno al suo asse trasversale, l'imbardata la rotazione attorno al suo asse verticale, e il rollio la rotazione longitudinale.

BRACCIO
Costituisce il segmento rigido dell'intero sistema: alle estremità di ciascun braccio è posto un giunto, generalmente di tipo rotatorio, planare o prismatico.

SPALLA
È il giunto rotoidale tra il corpo e il braccio, il cui movimento è definito "elevazione della spalla". È il giunto con dimensioni maggiori, poiché deve supportare il peso dell'intero braccio robotico.

CORPO
È il segmento collegato al basamento: generalmente queste due parti sono collegate da un giunto rotatorio, il cui movimento è definito "rotazione della spalla".

BASAMENTO
Costituisce il punto di collegamento e il punto più pesante per controbilanciare i movimenti del braccio robotico: può essere collegato a una base fissa, quindi bullonato su un piano, oppure su una base mobile, ad esempio con ruote o cingoli. Generalmente in quest'ultima categoria rientrano bracci robotici per eseguire operazioni su componenti e che non richiedono di muovere pezzi pesanti che possano controbilanciare il braccio .
Il basamento costituisce il punto 0, ovvero il punto di riferimento per le coordinate dei movimenti del braccio.

L'immagine rappresenta il funzionamento di un braccio robotico e delle sue parti.

IL BRACCIO ROBOTICO

Il braccio robotico può essere impiegato in differenti ambiti, grazie alla variabilità della struttura e delle dimensioni, che permettono quindi di utilizzare questo strumento in grandi impianti industriali o in laboratori dagli spazi ridotti. Ciò che caratterizza un robot è la flessibilità nella movimentazione ma soprattutto nel tipo di utensili che può impiegare. Il braccio robotico a differenza di una macchina CNC, può essere utilizzato per manifattura sottrattiva e anche additiva: in base all'utensile installato, il braccio infatti può eseguire lavorazioni per sottrarre materiale (come la fresatura di legno) o per depositare materiale (come il rilascio di calcestruzzo).

Il braccio robotico funziona come un braccio umano, composto da arti tra loro collegati; in funzione della tipologia dei giunti, le parti del braccio possono compiere differenti tipologie di rotazione, la cui combinazione consente di eseguire movimenti più o meno complessi.
Il braccio robotico è conosciuto anche come manipolatore, proprio per la sua morfologia antropomorfa. È costituto da segmenti rigidi, detti link o bracci, e da giunti rotatori o di traslazione, attivati da un motore, posto generalmente nella zona del corpo e del basamento.
I gradi di libertà di un braccio robotico sono definiti con l'acronimo DOF (Degree of Freedom) e dipendono dal numero e dalla tipologia di giunti tra i vari segmenti. Il giunto è il punto in cui le superfici dei due segmenti collegati si muovono l'una sull'altra e restano in contatto, con movimenti che possono essere di tipo rotatorio, planare, cilindrico, prismatico, sferico.
Il manipolatore è dotato di: attuatori che permettono il movimento delle parti, in genere elettrici o idraulici; interfaccia utente-macchina; sensori per misurare la posizione del braccio robotico e dell'end effector nello spazio di lavoro. Lo spazio di lavoro di un braccio robotico è proporzionato alla dimensione dei segmenti e alla tipologia di giunti (si distinguono più precisamente lo spazio raggiungibile, e il suo sottoinsime, lo spazio destro o di destrezza). Nello spazio di lavoro il punto 0 è rappresentato dalla posizione del basamento.

tesa come assemblaggio di parti meccaniche. Asimov attraverso i suoi racconti ha fatto della robotica una vera e propria disciplina, un'insieme cioè di norme che definiscono i metodi attraverso cui progettare e riconoscere i robot come strumenti in grado di eseguire e riprodurre lavori manuali.I suoi racconti sono conosciuti anche per aver introdotto le *Tre leggi della robotica*[24], alle quali si fa spesso riferimento nella progettazione dei robot intesi come macchine autonome e intelligenti: tuttavia la robotica non deve essere confusa con l'intelligenza poiché questa è un valore aggiunto e non un carattere proprio della robotica.

Se i racconti e le leggi di Asimov si riferiscono al comportamento e all'interazione di robot intelligenti nei confronti degli uomini, va ricordato che i robot non corrispondono tutti a queste caratteristiche, ma sono prima di tutto strumenti, progettati per svolgere il lavoro dell'uomo o collaborare con esso, specialmente in quelle attività che vengono riconosciute come pericolose o faticose.

1.4 Le generazioni dei robot

Il robot, indipendentemente dalla sua conformazione fisica, è quello strumento meccanico più o meno autonomo, capace di svolgere attività finora eseguite dall'uomo e in alcuni casi di amplificarle; è riduttivo associare i robot a macchine aventi figura antropomorfa o zoomorfa. Un robot è prima di tutto una macchina e come tale è caratterizzata dai gradi di libertà e dai gradi di autonomia. I gradi di libertà corrispondono alla capacità di movimento: maggiori sono i gradi più complessi saranno i movimenti che lo strumento potrà effettuare. A differenza di strumenti come le macchine a controllo numerico, il robot definisce i propri gradi di libertà in base al numero e alla tipologia di giunti tra i segmenti, o arti, che lo costituiscono. I gradi di autonomia si riferiscono invece alla capacità di no strumento di effettuare operazioni con un controllo totale, parziale o nullo da parte dell'uomo.

In funzione del grado di autonomia si possono descrivere una serie di generazioni per categorizzare e distinguere i robot. Alla prima generazione afferiscono robot privi di sensori e capaci di svolgere specifiche mansioni solo se impostate da comandi umani; la seconda generazione è costituita da robot dotati di sensori e quindi capaci di riconoscere lo spazio e il prodotto su cui lavorano; alla terza generazione afferiscono invece i robot capaci di rispondere alle sollecitazioni che si generano come conseguenza dell'attività che stanno svolgendo, queste macchine sono in grado di riprogrammare e ridefinire l'iter lavorativo in corso sulla base delle informazioni accumulate nel corso delle lavorazioni precedenti[25]. Alcuni robot, programmati e interrogati, senza altri interventi da parte dell'uomo sono in grado di sviluppare risposte e lavorazioni (anche complesse tanto da richiamare le dinamiche di un processo progettuale): questi robot si dicono dotati di intelligenza artificiale e non richiedono la competenza del progettista se non nell'iniziale fase di programmazione. In questa categoria si riconoscono i così detti robot di quarta generazione, dotati di intelligenza artificiale[26], di cui al momento sono operativi solo sistemi sperimentali e in ambiti d'azione diversi rispetto a quello delle macchine e dei robot delle generazioni precedenti.

L'autonomia non deve essere confusa con l'intelligenza artificiale, poiché il grado di autonomia è proprio dell'automazione, mentre l'intelligenza non è una caratteristica propria dell'automazione bensì un valore aggiunto. I robot oggi più avanzati sono in grado di raccogliere dati attraverso i sensori e di agi-

L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

Associare l'intelligenza artificiale a un robot antropomorfo o a un umanoide è un luogo comune, ma è soprattutto riduttivo. L'intelligenza artificiale è invece una scienza molto complessa, che coinvolge numerose discipline scientifiche, dalla fisica alla psicologia, e che può assumere differenti forme, non sempre riconoscibili attraverso le sembianze di un robot.
Obiettivo dell'intelligenza artificiale è quello di riprendere in maniera quanto più simile la forma dell'intelligenza umana, capace di dedurre, supporre ed elaborare soluzioni e idee a seconda del contesto e delle sue variabili (Anzalone, 2018).
Esistono differenti forme di intelligenza artificiale, si pensi ad esempio alle forme di assistenza come Siri di Apple, Google Home, Alexa con Amazon Echo, i tre prodotti oggi più diffusi nel mercato capaci di fornire informazioni e aggiornamenti all'utente, sfruttando la connessione web per reperire i dati. L'intelligenza artificiale viene applicata anche in altri ambiti, come quello automobilistico: l'ambizioso (ma sempre più vicino) progetto della macchina intelligente, ha l'obiettivo infatti di creare un mezzo completamente autonomo, svincolando l'uomo dalla necessità di guidare un mezzo, poiché questo è in grado di muoversi autonomamente riconoscendo il contesto.
L'impiego dell'intelligenza artificiale e il ruolo all'interno della società ha un riscontro etico molto importante, poiché non si può ancora immaginare e progettare il reale impatto che l'intelligenza artificiale potrà avere sulla condizione umana e sulle relazioni personali. Fin dall'antichità l'uomo attraverso la costruzione di automi, ha tentato di riprodurre forme di intelligenza, se pur in maniera meccanica: il Novecento con la digitalizzazione e la rete internet ha rappresentato un secolo di importanti cambiamenti, in cui le teorie hanno sempre più preso forma, come la macchina di Alan Turing del 1936 che ha posto le basi del calcolo computazionale, fino a definire questo ambito con il nome con cui oggi è riconosciuto: Intelligenza Artificiale (IA, oppure AI Artificial Intelligence). A partire dagli anni Cinquanta si organizzano convegni e dibattiti sul tema, inizialmente tra informatici, ingegneri e matematici, successivamente coinvolgendo anche psicologi, sociologi, antropologi, proprio per sviluppare un'intelligenza sempre più capace di rispondere, attraverso modelli matematici, in maniera umana. Nel campo della robotica sociale l'intelligenza artificiale viene impiegata soprattutto per l'utilizzo di robot capaci di interagire con l'uomo, per supportare la cura di malattie mentali, come la demenza senile o l'alzhaimer, ma anche per migliorare l'apprendimento e la socializzazione nei più piccoli, contribuendo a ridurre l'impiego di trattamenti farmacologici. Si tratta di robot zoomorfi, robot cioè dalle sembianze animali, come un cane, un gatto o anche una foca: sembrano comuni peluche, si tratta tuttavia di sofisticate macchine capaci di interagire con il paziente. Questa interazione si basa su un particolare procedimento noto come Terapia Assistita con Animali (Pet Therapy), che si basa sullo sviluppo di un'interazione tra paziente e animale, per migliorare la comunicazione e l'empatia, e conseguenti benefici sullo stato mentale del paziente. L'intelligenza artificiale da queste prime applicazioni sulla Pet Therapy, si trova sempre più impiegata anche per l'interazione con androdi, robot cioè con una struttura umana (corpo, gambe, braccia, mani e testa) ma dalle sembianze fisiche meccaniche e non umane. Nella robotica sociale uno dei robot umanoidi più noti è Pepper, utilizzato per il supporto a terapie mediche (ad esempio con bambini autistici) o per la prima accoglienza in luoghi pubblici, come ospedali o alberghi, e fornire agli ospiti informazioni nella lingua richiesta (è il caso del Parc Hotel di Peschiera del Garda, Verona, in cui nel 2017 ha sperimentato l'impiego di Pepper come receptionist, migliorando giorno dopo giorno la qualità e la precisione delle risposte, imparando il lavoro e sviluppando un linguaggio di lavoro appropriato; il progetto è stato supportato da CISET - Centro Internazionale di Studi sull'Economia Turistica dell'Università Ca' Foscari).
In Italia l'Associazione Italiana per l'Intelligenza Artificiale (AI*IA) promuove la ricerca, la divulgazione e l'impiego dell'intelligenza artificiale in vari ambiti, da quello sociale a quello produttivo. È una associazione scientifica senza fini di lucro, fondata nel 1988 e che oggi raccoglie numerosi ricercatori nel campo dell'intelligenza artificiale, coinvolgendo atenei, gruppi di ricerca e aziende del settore. Le aree tematiche in cui operano sono soprattutto: Machine Learning, Natural Language, Optimization, Robotics, Computer Vision, Human-computer Interaction, Speech Processing, Users, Knowledge-Based Systems, Security, Formazione, Recruiting (AI*IA, gennaio 2018).





In alto. Smartphone e Google Home permettono di controllare da remoto la propria automobile, grazie a un software installato sull'auto: si tratta del programma MercedesMe con il quale Google Home può interagire per accendere l'auto, ad esempio acclimatare l'abitacolo o controllare i livelli di carburante. In basso il robot foca Paro utilizzato in ambito sociale, soprattutto per le Terapie Assistite con Animali, per persone con difficoltà cognitive.

re in funzione dei risultati ottenuti dall'accumulazione nel tempo di tali dati, in relazione ai parametri impostati nella fase di progettazione del lavoro della macchina; questo genere di robot è detto "collaborativo" (fig. 04) ed è in grado di lavorare fianco a fianco con l'uomo. Tale categoria è conosciuta anche con il nome di cobot (collaborative robot).



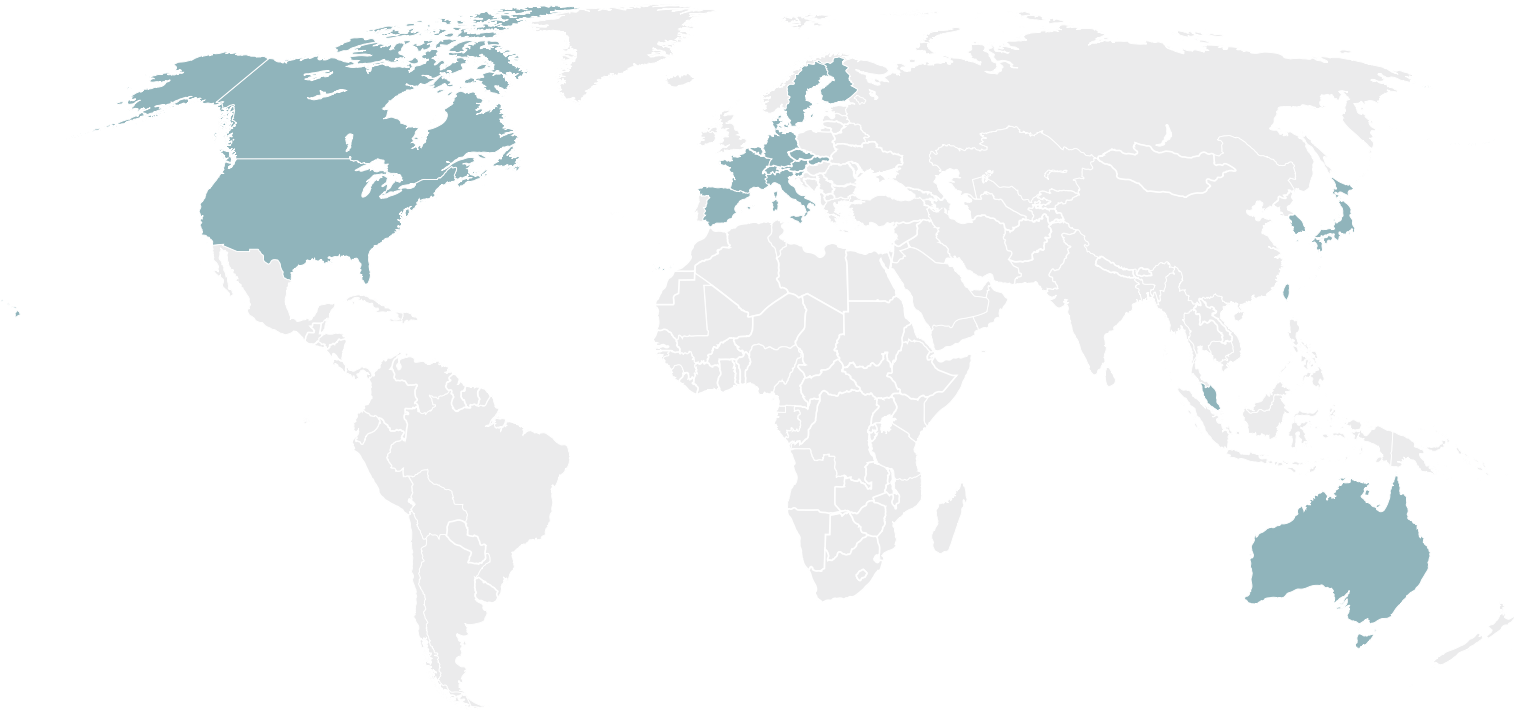
04. Humanfactoring, il processo di collaborazione uomo e robot sviluppato da COMAU (Italia). COMAU

1.5 Una classificazione della robotica

La robotica, inizialmente applicata in ambito industriale, a partire dagli anni Settanta è stata trasferita anche in altri settori e questo percorso ha preso avvio dai numerosi studi condotti sugli automi e integrando ad essi le innovazioni dell'epoca, come l'informatica, i nuovi materiali e la rete web. Si sono così sviluppati nuovi ambiti di applicazione e di evoluzione della robotica, volti a produrre non più manipolatori o braccia antropomorfe, ma macchine complesse, autonome, capaci di svolgere attività differenti e prive delle sembianze fisiche che caratterizzavano i primi robot simili agli uomini. La varietà e la rapida evoluzione di queste macchine consente e richiede la loro organizzazione in categorie definite in funzione della morfologia e delle attività che i robot sono in grado di svolgere. I robot possono essere antropomorfi o zoomorfi, cioè possono avere sembianze e strutture simili a quelle umane o a quelle animali o a loro parti, come il braccio: questi sono conosciuti come umanoidi o androidi[27] e hanno una struttura (intesa come funzionamento meccanico del robot) che ricorda il meccanismo di un essere umano o animale. Ad esempio hanno "zampe" per saltare che ricordano le zampe di un cane, o bracci manipolatori composti da parti che ricordano quelle del braccio umano; non a caso, i termini tecnici delle parti di un robot corrispondono ai nomi utilizzati per indicare parti del corpo umano.

La progettazione di un robot più o meno antropomorfo è funzionale all'attività che deve svolgere, e in alcuni casi le sembianze umane o animali possono influire in maniera significativa nell'interazione con l'ambiente esterno e/o con l'uomo. Nel 1970 Mori Mashiro pubblica sulla rivista *Energy* la ricerca sperimentale *The uncanny valley*[28] e ipotizza l'interazione di uomo e androide (robot antropomorfo, detto anche umanoide): quanto più la fisionomia della macchina è umana, tanto più l'uomo prova un senso di inquietudine (Ferrari, 2015). Ad oggi, la progettazione di androidi è sviluppata soprattutto nel campo della **robotica sociale**, che è rivolta a fornire assistenza, ad esempio agli anziani in attività ludiche e giochi mnemonici utili ad alleviare le conseguenze di malattie come l'alzheimer; tali robot possono interagire anche con i bambini, per attività ludiche ed educative, o con i viaggiatori e i pazienti, per attività di accoglienza e prima assistenza[29]: in questi contesti l'uomo è portato ad instaurare con il robot un rapporto di familiarità.

I **robot di servizio** invece sono strumenti che possono compiere una o più attività in sostituzione parziale o completa dell'uomo: non è necessario che i robot siano androidi ma è richiesto che siano capaci di svolgere in autonomia un'attività specifica. Rispetto agli androidi, la cui attività principale è l'interazione con l'uomo per scopi sociali e quindi "necessitano" di apprendere dal comportamento umano e di evolvere in funzione di esso al fine di migliorare l'interazione con le persone, i robot di servizio devono compiere un'attività specifica in funzione del contesto in cui stanno operando, ottimizzando le ri-



DISTRIBUZIONE DEI ROBOT INDUSTRIALI NEL MONDO							
Nazione	Robot Density	Nazione	Robot Density	Nazione	Robot Density	Nazione	Robot Density
Corea del Sud	631	USA	189	Canada	145	Svizzera	128
Singapore	488	Italia	185	Austria	144	Repubblica Ceca	101
Germania	309	Belgio	184	Finlandia	138	Australia	83
Giappone	303	Taiwan	177	Slovenia	137		
Svezia	223	Spagna	160	Slovacchia	135		
Danimarca	211	Olanda	153	Francia	132		

05. Distribuzione dei robot industriali nel mondo. Il valore Robot Density corrisponde alla densità di robot installati e in uso ogni 10 mila addetti. La media internazionale di robot installati è di 74. Nella tabella sono riportati i Paesi che superano tale valore. L'Italia si colloca all'ottavo posto (fonte IFR - International Federation of Robotics 2016)

sorse di cui dispongono. I robot di servizio più comuni sono quelli impiegati per svolgere attività domestiche[30] anche in presenza di essere umani, vengono utilizzati anche per l'esplorazione e per operazioni in contesti ove non vi è sicurezza, sollevando le persone da incarichi pericolosi[31]. I robot possono eseguire anche interventi chirurgici in stretta collaborazione con l'uomo, ampliandone le capacità ad esempio in termini di precisione o di rapidità: questo significa anche dotare la chirurgia di strumenti precisi e manovrati a loro volta con estremo rigore. Il caso della medicina costituisce un settore in cui uomo e macchina collaborano e l'intervento del robot potenzia le capacità del medico, andando oltre i limiti imposti dalla natura umana.

La **robotica industriale** registra variazioni morfologiche maggiori rispetto ai casi precedenti e si sviluppa in funzione all'attività che la macchina deve svolgere all'interno della linea di produzione e della presenza o assenza di un operatore umano. La tendenza negli ultimi decenni è quella di sviluppare la collaborazione tra robot e uomini all'interno della stessa attività, quindi robot che possano offrire direttamente un supporto all'attività dell'uomo garanten-



07. NEXTAGE è un robot umanoide prodotto da Kawada Industries. Il robot ha due sensori, come occhi, e due braccia per assemblare. È stato sviluppato per essere inserito nella linea di produzione e cooperare con gli addetti. Nell'immagine accanto NEXTAGE presso la GLORY LTD, produttore di distributori automatici a Kazo (Tokyo, Giappone): la GLORY LTD è stata la prima azienda a utilizzare questa tecnologia e ha inserito 19 umanoidi NEXTAGE per l'assemblaggio di componenti. REUTERS/Issei Kato 2015.

do la sua incolumità. Oggi la robotica industriale prevede un largo impiego di isole robotizzate, ovvero aree delimitate da una griglia di sicurezza in cui i robot operano senza la presenza fisica di operatori. La ricerca sta sviluppando forme di integrazione tra robot e persone, considerando i robot come strumenti e definendo i robot collaborativi con il nome di *cobot*[32], per distinguerli dai robot progettati per lavorare in autonomia. COMAU, azienda italiana e leader mondiale nella produzione di robot, dal 2017 sta promuovendo l'idea di industria *Humanfacturing*, in cui le macchine collaborano con l'uomo e non sono più collocate in isole confinate. Ciò è possibile grazie all'impiego di robot sofisticati, in grado di riconoscere la presenza dell'uomo nello spazio di lavoro attraverso sensori tattili e visivi. Se *Humanfacturing* rappresenta una produzione particolarmente automatizzata, dall'altro riporta il valore dell'essere umano al centro del sistema produttivo. Una prospettiva ben diversa è sviluppata dalle "fabbriche a luci spente", in cui la presenza dell'uomo non è prevista e quindi non è necessario illuminare l'ambiente di lavoro. A questa seconda categoria di industre appartengono le *Smart light manufacturing* (o *Lights Out Manufacturing*) sviluppate a partire dagli anni Ottanta, quando le prime macchine CNC sono entrate nelle linee di produzione industriale, automatizzando molte attività.

Queste descritte sono forme di automazione differenti, una completamente autonoma e l'altra collaborativa, che delineano scelte aziendali diverse e relazionate al tipo di attività a cui l'automazione, e la robotica come suo principale strumento, sono destinati.

L'automazione all'interno della filiera industriale può determinare anch'essa differenti grandi categorie di robot e può essere applicata a singoli processi o all'intera linea, la principale difficoltà resta la coordinazione tra le fasi della lavorazione e le fasi di montaggio e per molto tempo ha rappresentato "l'anello più debole della catena dell'automazione" (Lilley, 1957, pag. 46). Oggi tali difficoltà vengono superate grazie all'impiego di robot, strumenti autonomi e non necessariamente vincolati a una postazione fissa, vincolo che invece caratterizza le macchine CNC. Emblematico, in tal senso, è il caso del trasporto di

AUTOMAZIONE AMAZON

Amazon è la più importante azienda del mercato e-commerce e della distribuzione, nata nel 1994 a Seattle con il nome di Cadabra, per il commercio online di libri. Ci sono voluti circa 10 anni per consolidare l'attività ed espandere il proprio mercato oltre quello iniziale dell'editoria: dal 2003 Amazon registra una costante crescita (oggi il suo fondatore Jeffrey Preston Bezos è l'uomo più ricco al mondo). Al fine di ottimizzare le fasi di smistamento della merce nei magazzini, una delle fasi più impegnative all'interno dell'intero processo, nel 2012 Amazon ha acquisito Kiva System, azienda produttrice di robot di servizio per movimentazione merci. La necessità di Amazon era infatti quella di poter gestire le crescenti quantità di merci in magazzini sempre più ampi, e sostituire i così detti "runners", gli operatori incaricati di raccogliere i prodotti nel magazzino. Nel 2014 Amazon mette in servizio oltre 100 mila robot per lo spostamento degli scaffali contenenti le merci da distribuire: si tratta di robot di servizio su 4 ruote dal peso di 140 kg, capaci di trasportare fino a 340 kg autonomamente. Riconoscono attraverso la lettura di specifici codici gli scaffali da muovere e il luogo di destinazione da raggiungere, dove l'operatore può terminare il corretto smistamento della merce e procedere con la spedizione finale. L'area degli scaffali è strettamente riservata ai robot e a un numero ristretto di operatori per la manutenzione e il controllo. In Italia ci sono 13 centri di smistamento Amazon: Avigliana (To), Origgio (Va), Rogoredo (Mi), Crespellano (Bo), Calenzano (Fi), Vigonza (Pd), Pomezia (Rm) e Fiano Romano (Rm), Buccinasco (MI), Castel San Giovanni (PC), Passo Corese (Rieti), Vercelli e il più recente Torrazza Piemonte (TO). Gli ultimi quattro centri sono robotizzati.

Principali settori della robotica	OBIETTIVO	MORFOLOGIA	INTERAZIONE UOMO-ROBOT
Robotica sociale **Androide o umanoide** (ad esempio l'umanoide per l'attività di assistenza in albergo)	Interagire con l'essere umano	Antropomorfa e zoomorfa, tendenzialmente mobile	Necessaria al fine di instaurare un dialogo con l'essere umano
Robotica di servizio (ad esempio robot per pulizia superfici domestiche)	Compiere un'attività specifica, in funzione del contesto in cui sta operando, attraverso un'ottimizzazione delle risorse di cui dispone; l'attività dell'uomo viene parzialmente o totalmente sostituita	Variabile in funzione dell'attività da svolgere: può essere su base fissa o mobile	Non necessaria, il robot infatti si può limitare al riconoscimento della presenza di un essere umano per motivi di sicurezza
Robotica industriale	Compiere più o meno attività differenti al fine di raggiungere gli obiettivi di produzione industriale; l'attività dell'uomo viene parzialmente o totalmente sostituita, soprattutto nel caso di attività pericolose per la salute dell'uomo	Variabile in funzione dell'attività da svolgere: può essere su base fissa o mobile	Non necessaria, il robot infatti si può limitare al riconoscimento della presenza di un essere umano per motivi di sicurezza
Robotica per la ricerca	Compiere differenti attività in funzione del contesto di ricerca	Variabile in funzione dell'attività da svolgere: può essere su base fissa o mobile	Non necessaria, il robot infatti si può limitare al riconoscimento della presenza di un essere umano per motivi di sicurezza

08. Principali campi di applicazione della robotica: ciascuna categoria definisce gli obiettivi dei robot e la forma d'interazione con l'uomo.

materiali e prodotti all'interno dell'industria: sempre più spesso questo lavoro non è effettuato solamente tramite muletti e nastri trasportatori perchè i robot trasportatori sono capaci di muoversi autonomamente grazie a sensori e alla georeferenziazione dello spazio[33]. Una prima macro categoria di robot industriali è quindi quella dei robot trasportatori, per l'impiego dei quali Amazon è oggi uno dei leader mondiali: i robot di Amazon sono capaci di muovere prodotti e coordinarsi gli uni con gli altri negli spostamenti in funzione dell'attività richiesta, riducendo sempre più il lavoro umano nei processi di smistamento dei prodotti e organizzazione interna, che sono le operazioni più intense dal punto di vista del lavoro fisico e manuale.

La seconda macro categoria di robot industriali è quella impiegata per la lavorazione materiale, settore sul quale si sono sviluppati i primi robot industriali[34]. La robotica in questo caso ha contribuito nell'automazione di processi non solo di lavorazione diretta sulla materia, quindi asportazione o aggiunta, ma soprattutto di assemblaggio e montaggio. Il braccio antropomorfo, coordinato con altri strumenti fissi o mobili, può muovere pezzi all'interno di una linea di produzione e assemblarli in unità più complesse, mantenendo il controllo del posizionamento dei pezzi e del collegamento tra le parti. Il primo robot industriale per la lavorazione materiale è stato sviluppato dalla Ultimate Inc. per i processi di pressofusione, successivamente sono stati sviluppati robot capaci di effettuare altre lavorazioni, come la spruzzatura di vernice o la fresatura di parti[35], ampliando i movimenti della macchina e sfruttando i gradi di libertà dello strumento. Questa capacità di movimento e la possibilità di cambiare gli utensili senza interrompere la lavorazione[36] hanno fortemente contribuito all'impiego di robot nelle fasi di lavorazione industriale che prevedono il montaggio di parti. A partire dagli anni Sessanta l'automazione viene applicata anche in questo processo, che aveva fino a quegli anni rappresentato il più complesso da trasformare e automatizzare. Fu l'azienda Olivetti a sviluppare il primo robot di montaggio, mettendo in pratica le ricerche delle proprie aziende interne OCN (Olivetti Controllo Numerico) e OSAI (Olivetti Sistemi per l'Automazione Industriale)[37]: a partire dal 1976 il brac-

MAGGIORI PRODUTTORI DI BRACCI ROBOTICI PER L'INDUSTRIA			
Azienda	Paese	Anno	Settore merceologico a inizio attività
ABB Robotics (Asea Brown Boveri)	Zurigo, Svizzera	1988	È la fusione di due società: ASEA - Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget (Compagnia dell'energia elettrica svedese, 1833); Brown, Boveri & Cie (BBC) per la produzione di generatori, turbine e trasformatori (Baden, Svizzera, 1891).
Yaskawa Electric Corporation	Kitakyushu, prefettura Fukuoka, Giappone	1915	Produzione di motori per macchine utensili e turbine.
KUKA (Keller Und Knappich Augsburg)	Augusta, Germania	1898	Produzione di sistemi luminosi per spazi urbani.
FANUC (Factory Automation NUmerical Control)	Minamitsuru, prefettura di Yamanashi, Giappone	1956	Macchine a controllo numerico.
Kawasaki	Kobe, Giappone	1896	Carpenteria navale.
Epson Robots	Suwa, prefettura di Nagano, Giappone	1942	Produttore di componenti per orologi di precisione (per Suwa Seikosha Co.)
Stäubli	Horgen, Svizzera	1982	Produttore macchine utensili per tessitura.
Nachi Fujikoshi Corporation	Toyama, prefettura di Toyama, Giappone	1928	Produttore macchine utensili.
COMAU (COnsorzio MAcchine Utensili)	Torino, Italia	1973	Raggruppamento aziende produttrici di componenti le automobili VAZ di Togliatti (Russia).
Omron Adept Technology	San Francisco, California	1983	Automazione per l'industria.

09. I maggiori produttori di bracci robotici per il settore manifatturiero (fonte ChinaDaily.com, novembre 2015). È interessante osservare come la maggior parte di queste aziende ad eccezione di Omron e Fanuc, siano nate da specifici settori al fine di migliorare la tecnologia per la produzione di tessuto, auto, turbine, navi, motori.

cio robotico venne messo in commercio con il nome di SIGMA. In quegli stessi anni la robotica sbarca in Giappone, fertile terreno per lo sviluppo tecnologico e oggi leader mondiale nella produzione di androidi; sono gli stessi anni in cui prendono forma alcune delle aziende oggi capofila mondiali nella produzione di robot industriali, la tedesca KUKA e l'italiana COMAU.

I robot non solo riproducono le operazioni di lavoro tipiche dell'uomo, ma le potenziano in termini di precisione, ottimizzazione delle risorse materiali impiegate e quantità produttiva. Negli anni Settanta la robotica industriale non interessa più solo i settori automobilistico e aeronautico, ma si espande in altri comparti produttivi e manifatturieri, come quello edilizio. La progettazione e la diffusione di robot sempre più sofisticati e tecnologicamente avanzati permette l'adattamento delle macchine a differenti tipologie di lavorazione e a diversi ambienti di lavoro, non più circoscritti all'interno di un'isola protetta per l'incolumità degli operai, ma accessibili all'uomo e in alcuni casi capaci di muoversi, come negli stabilimenti Amazon. Queste competenze permettono alla robotica di essere applicata anche al di fuori di un ambiente controllato come la fabbrica e di operare in ambienti più complessi come nelle sperimentazioni dei cantieri edilizi in Giappone più recentemente coordinati dall'ing. Thomas Bock[38], tra i maggiori esperti internazionali di robotica per il cantiere.

Accanto alla robotica sociale, di servizio e industriale, sta prendendo sempre più piede anche la **robotica scientifica**, e cioè una robotica applicata alle attività condotte nei laboratori di ricerca, come strumento per la sperimentazione e l'implementazione delle capacità umane in svariati ambiti scientifici e a fini di ricerca. Per quanto questi strumenti possano presentare caratteristiche completamente differenti, in funzione anche dei differenti obiettivi da raggiungere, ciò che li caratterizza è la programmabilità e quindi la capacità

di adattamento a differenti operazioni a seconda dei comandi trasmessi attraverso software di controllo. A differenza dei robot industriali, i robot per fini scientifici non hanno la necessità di rispondere a particolari quantitativi di produzione; essi non devono necessariamente interagire con l'uomo, come avviene per la robotica sociale. È proprio la robotica scientifica ad aprire a nuove prospettive di sviluppo, a indicare oggi la direzione per la definizione di una nuova idea di manifattura che, anche nel caso della produzione edilizia, può sfruttare l'intelligenza artificiale e le nuove fonti energetiche per svilupparsi e ampliare la gamma delle possibili applicazioni della robotica.

Note

1 Samuel Lilley, "Mathematical Machines", in Nature, 149, 1942, pp. 462-465.

2 Pubblicazione edita da Lawrence & Wishart, Londra.

3 Il libro è formato da tre volumi e furono pubblicati per la prima volta a Roma nel 1654.

4 L'aria calda pone in rotazione una turbina sulla quale sono infisse delle lamelle, che a loro volta muovendosi riescono a toccare delle corde e riprodurre suoni.

5 "Se queste sono state le ipotesi maggiormente accreditate durante gli ultimi tre secoli, è qui doveroso illustrare una teoria assai suggestiva affermatasi durante gli anni più recenti. I colossi di Memnone sono composti di quarzi arenitici della Nubia; questa pietra, al pari delle arenarie, delle quarziti e delle rocce granitoidi, se riscaldate rapidamente, sono in grado di produrre onde sonore per gli attriti tra i diversi componenti cristallini. Analoghe proprietà hanno anche le itacolumite del Brasile. Un'ipotesi fondata mi sembra quella di individuare nel colosso di Memnone l'origine del mito antico che ruota intorno alla statua parlante, mito che tanta eco avrebbe suscitato nel corso dei secoli, non solo nelle numerose proposte meccaniche di automi, ma anche nel più vasto mondo culturale, fino al Don Giovanni di Lorenzo Da Ponte e Wolfgang Amadeus Mozart" (Latanza, 2003).

6 Per maggiori dettagli si veda "Tecnica curiosa. Dall'infanzia delle macchine alle macchine inutili" di Paolo Portoghesi (Edizioni Medusa, Milano, 2014) pp. 174-175: "Il trattato Degli Automati ovvero macchine semoventi ebbe diffusione in Italia alla fine del Cinquecento nella traduzione che ne fece Bernardino Baldi, abate di Guastalla. In due libri vi è descritto chiaramente il modo di costruire su dei piedistalli dei teatrini meccanici in cui si potevano allestire vere e proprie rappresentazioni a soggetto. Il principio motore è quasi sempre la puleggia e l'autore dimostra nelle sue invenzioni una completa padronanza degli accoppiamenti cinematici e una conoscenza sicura degli impieghi degli organi di trasmissione. In Erone esistono in potenza lo sfruttamento della forza del vapore e la turbina a reazione e, a non considerare lo spirito, la funzione di queste fantasie, ci si potrebbe stupire che solo dopo tanti secoli sia stata compresa l'enorme potenza che si nascondeva in tali meccanismi.

7 I sistemi a molla con scappamento sono sistemi meccanici utilizzati per muovere gradualmente gli ingranaggi, fermando periodicamente i denti di una ruota: questo sistema è collegato a una molla o a un peso come il pendolo che permette la ripetitività del processo. Questi sistemi sono utilizzati soprattutto per orologi nelle piazze delle città europee.

8 Villard de Honnecourt è architetto e disegnatore del XIII secolo. Il suo taccuino raccoglie scritti su una serie di edifici e dei loro cantieri: esso costituisce il primo esempio di trattato di ingegneria. Fissa sulla carta e diffonde tecniche, macchine e suggerimenti sul modo di operare nella costruzione delle grandi cattedrali, di cui Villard stesso fu maestro.

9 Lorenzo Rosenegger autore di un teatrino idraulico, 1752; Friederich von Knauss autore di una macchina da scrivere automatica, 1760; Wolfgang von Kenplen autore di una macchina parlante, 1778; Pierre Jacquet-Droz e Henri-Louis Jacquet-Droz autori di meccanismi quali lo scrivano, il disegnatore, la musicista.

10 Alcune pubblicazioni della letteratura tecnica sono ad esempio: Giulio Paschali, "Teatro de los instrumentos y figuras matematicas y mecanicas", Lione 1602; Vittorio Zonca, "Novo teatro di machine et edificii", Padova 1607; Heinrich Zeising, "Theatrum machinarum so in sechs Theil bestehend...", (Lipsia 1614); Lucio Abramo Perci, "Theatrum theatrorum machinarum", Napoli 1624; Giovanni Branca, "Le macchine", Roma 1629; Georg Andreas Boeckler, "Theatrum Machinarum Novum", Norimberga 1662; Jacob Leupold, "Theatrum machinarum hydraulicarum", Lipsia 1724-25.

11 "Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers oppure Encyclopédie".

12 "Negli opifici, ancora legati alla tradizione artigianale, si sviluppano i primi rudimenti di suddivisione del lavoro, necessariamente legati alla progettazione di macchine 'speciali', in contrapposizione alle macchine 'universali'. In questo contesto economico-culturale nascono le prime esperienze per una cultura tecnologica e industriale, fortemente radicata sul territorio", Marchis, 1994, pag. 170.

13 Con fabbrica si indica lo spazio in cui si sviluppa l'industria: si ricordano in Inghilterra nel Settecento le prime industrie tessili e quelle dei chiodi.

14 "[D.K. Clark nel 1862 dichiara:] i costruttori di macchine stanno arrivando a un tipo comune di progettazione e di costruzione […] Tutte le viti vengono filettate da congegni a vite; i torni per ruote hanno tutti dischi con comandi a cremagliera circolare nella parte posteriore; e tutti sono adattati in modo da poter lavorare da soli; simultaneamente o accoppiati. Inoltre tutti i costruttori di macchine utensili sono del parere di applicare metodi di lavorazione automatici". Galloway D.F., "Macchine utensili", in Singer C., Storia della tecnologia - L'età dell'acciaio, 1965, pag. 648.

15 "Questa macchina poteva lavorare automaticamente con continuità, finché gli si fornivano pezzi, o fino a quando non si doveva provvedere alla sostituzione degli utensili consumati o avariati" (Galloway, 1965, p. 651).

16 La British Association oggi conosciuta come British Science Association, è stata fondata nel 1831 per lo sviluppo e la promozione della scienza.

17 Traduzione personale tratta da discorso di Mr Fairbairn, 1861: "When I first entered this city [said Mr. Fairbairn], the whole of the machinery was executed by hand. There were neither planing, slotting, nor shaping machines; and, with the exception of very imperfect lathes and a few drills, the preparatory operations of construction were eifected entirely by the hands of the workmen. Now, everything is done by machine-tools with a degree of accuracy which the unaided hand could never accomplish. The automaton or self-acting machine-tool has within itself an almost creative power ; in fact, so great are its powers of adaptation, that there is no operation of the human hand that it does not imitate" (Smiles, 1863, p. 177).

18 Samuel Lilley nella sua pubblicazione del 1957 paragona gli hardware a dei cervelli perché viene affidato loro il compito di calcolare come dei cervelli appunto. Fino ad allora nessuna macchina era stata in grado di eseguire un'operazione simile, storicamente affidata alla competenza umana.

19 I robot UNIMATE per la saldatura vengono installati in Italia nel 1972, per la FIAT (Graziosi Andrea, "La ristrutturazione delle grandi fabbriche 1973- 1976", Milano, Feltrinelli, 1979, pp. 158).

20 Ad esempio due aziende leader nella produzione mondiale di automazione e robotica si sono sviluppate proprio accanto alle industrie automobilistiche: l'azienda italiana COMAU alla FIAT, mentre la tedesca KUKA alla società Wolkswagen.

21 Titolo originale dell'opera è Rossumovi univerzální roboti – R.U.R.

22 Sebbene l'associazione del termine robota alla storica figura dell'automa e la diffusione di tale idea sia dovuta all'intuizione di Karel Čapek, l'invenzione del termine robota viene invece attribuita al fratello Josef Čapek, anche lui artista.

23 L'opera originale è pubblicata da Gnome Press nel 1950, "I, robot": la prima edizione italiana è pubblicata da Bompiani nel 1963.

24 Prima legge: un robot non può recar danno a un essere umano né permettere che, a causa del proprio mancato intervento, un essere umano riceva danno; Seconda legge: un robot deve obbedire agli ordini impartiti dagli essere umani, purché tali ordini non contravvengano alla Prima Legge; Terza legge: un robot deve proteggere la propria esistenza, purché questa autodifesa non contrasti con la Prima e con la Seconda Legge. Dal Manuale di Robotica - 56esima edizione 2058 d.C., pubblicate per la prima volta nel racconto "Runaround" (tr. it. Circolo vizioso), pubblicato nel 1942 sulla rivista Astounding Science Fiction.

25 Secondo il prof. Hans Moravec (Carnegie Mellon University, Robotics Institute), è possibile classificare i robot in quattro generazioni in base al proprio grado di autonomia. Descrive tale concetto associando le categorie di robot ad animali: i robot di prima generazione sono come le lucertole (robot che eseguono ordini preimpostati e sono privi di sensori); i secondi sono come i topi (robot dotati di sensori capaci di rilevare le condizioni esterne); i terzi come le scimmie (robot capaci di scegliere sulla base di esperienze precedenti) e i quarti come gli umani. L'ultima generazione corrisponde a una forma di intelligenza nota come Intelligenza Artificiale. I limiti di questa intelligenza sono sconosciuti, specialmente nell'area della creatività. Queste generazioni sono state descritte dal prof. Moravec durante un'intervista condotta da NOVA (una serie televisiva dedicata alla scienza, prodotta da PBS) e trasmessa nell'ottobre del 1997.

26 Esistono solo prototipi sperimentali, soprattutto nell'ambito della movimentazione, cioè robot capaci di muoversi autonomamente, aprire porte o saltare ostacoli: robot capaci di imparare e applicare. Queste forme avanzate non esistono ancora nel settore industriale e produttivo.

27 L'androide è un robot, quindi una macchina munita di apparato elettronico: l'automa invece è un apparato meccanico privo di sistema elettronico e informatico.

28 Titolo originale "Bukimi no tani" in Energy, 7(4), 33–35, traduzione in inglese di K. F. MacDorman & T. Minato.

29 Nel 2017 CISET (Centro Internazionale di Studi sull'Economia Turistica dell'Università Ca' Foscari) ha sperimentato l'inserimento dell'androide Pepper nel Parc Hotel di Peschiera del Garda, in qualità di receptionist, per rispondere alle richieste di prima accoglienza, imparare il lavoro e quindi migliorare la propria capacità di risposta, e la possibilità di tradurre queste informazioni in tre differenti lingue.

30 I robot per la pulizia sono tra i più sviluppati in quanto capaci di riconoscere differenti superfici e gradi di intervento (più o meno sporco): si possono muovere su superfici orizzontali e verticali, in ambienti differenti, anche all'interno dell'acqua, come i robot per pulire le vasche delle piscine.

31 I robot esplorativi in zone poche sicure come quelle colpite da terremoto oppure in azioni di guerre come nei campi minati.

32 Il termine cobot deriva dall'abbreviazione di co-robot, ovvero un robot che collabora fisicamente e condivide lo spazio di lavoro con l'uomo. Il termine è introdotto nel 1996 dai professori Edward Colgate e Micheal Peshkin. La General Motors è stata tra le prime a sperimentare questa forma di collaborazione, a partire dagli anni Novanta, coniando tuttavia un'altra definizione IAD – Intelligent Assistent Device, ovvero un'intelligenza, intesa in questo caso come capacità di riconoscimento, volta a proteggere l'uomo nelle vicinanze della macchina.

33 Questo sistema è stato sviluppato soprattutto per il trasporto di materiale pesante, come ad esempio le bobine di carta per la stampa di quotidiani: un muletto automatizzato è capace di selezionare la bobina all'interno del magazzino e trasportarla fino alle rotative per l'avvio della stampa (visita stabilimento di Torino, de La Stampa, febbraio 2015), seguendo indicatori inseriti nel magazzino e sui prodotti da trasportare, come qr-code.

34 Il primo robot industriale è quello introdotto da General Motors, per trattamenti di pressofusione.

35 Alcuni esempi: l'azienda norvegese Trallfa produce nel 1966 il primo robot per la verniciatura di componenti meccanici per il settore agricolo; Dea - Digital Electronic Automation, nel 1969 inventa il primo robot di misura, capace di verificare con precisione micrometrica componenti industriali; Milacron sviluppa nel 1974 il primo robot capace di scegliere punte da trapano sulla base delle lavorazioni indicate dall'operatore.

36 1974, The tomorrow tool della statunitense Milacron, robot capace di scegliere l'utensile adatto al tipo di lavorazione.

37 SIRI Associazione Italiana di Robotica e Automazione, 1975. Altre due importanti innovazioni italiane nel campo dell'automazione sono state i robot di misura (DEA, 1965) e i robot laser (ZAC, 1979).

38 Per approfondire si veda paragrafo 2.4 L'automazione della produzione.

capitolo due

L’automazione e l’architettura

capitolo due

L’automazione e l’architettura

L’impiego dell’automazione in architettura si estende a differenti processi, dall’elaborazione del disegno digitale alla produzione del componente edile. L’informatica e l’evoluzione degli strumenti digitali hanno contribuito non solo a ridefinire alcune fasi e processi del progetto e della costruzione dell’architettura, ma ne hanno fortemente caratterizzato anche l’interazione, arricchendo e favorendo lo sviluppo di dinamiche di collaborazione interdisciplinari.
La storia della produzione industriale di componenti edili si fonda sullo sfruttamento della meccanizzazione del processo, potenziando la produzione in serie di elementi. L’impiego degli strumenti dell’automazione, quali software e macchine a controllo numerico, trasforma la produzione e consente la customizzazione di ciò che viene prodotto in serie. Gli strumenti più recenti, ad esempio il braccio robotico, stanno consentendo lo sviluppo di forme di produzione su misura, in cui l’elemento edilizio può rispondere a quanto viene definito nel progetto architettonico. I confini tra il mondo industriale e quello artigianale si riducono, e le potenzialità di ciascun ambito si fondono in quello che la tesi identifica come una nuova forma di manifattura: la manifattura ibrida. A promuovere tale processo sono soprattutto i centri di ricerca strutturati all’interno dell’università ed enti fortemente legati con il territorio.
La cultura digitale ha introdotto nuovi termini nel linguaggio tecnico, ma ha anche contribuito a ridefinire quelli esistenti, come industrializzazione, manifattura, componenting. La prima parte del capitolo indaga questa trasformazione, restringendo il campo d’indagine alla produzione di componenti edili; la seconda parte descrive i principali processi di produzione, rivolti sia alla lavorazione materiale che al montaggio di elementi per unità più complesse.

Le nuove tecnologie legate alla digitalizzazione dell'industria stanno contribuendo a ridefinire i processi di ideazione, progettazione e produzione propri dell'architettura; ciò avviene rapidamente sebbene il settore edilizio sia lento ad acquisire tali trasformazioni (Sinopoli, 2002, p. 10). Questo settore eredita processi, prodotti e materiali da altri ambiti, soprattutto da quello aeronautico e da quello navale (Kieran e Timberlake, 2004), ne elabora il sistema di progettazione per parti e di montaggio e, grazie alla padronanza di nuovi strumenti e materiali, la progettazione architettonica ridefinisce i propri limiti (Gramazio e Kohler, 2008). Nel settore edilizio l'impiego della robotica e dell'automazione è ancora limitato, ma cresce il numero di ricerche scientifiche rivolte a indagare il rapporto tra questi nuovi strumenti e la progettazione architettonica[1].

L'impiego dell'automazione e della robotica in architettura è un tema ampio e il più delle volte frainteso, poiché spesso si immaginano processi indipendenti dall'uomo[2] mentre è necessario riconoscere differenti gradi di autonomia e automazione, a seconda della lavorazione e del processo in cui il robot o ogni altro strumento sono impiegati. Vanno inoltre considerati gli ambiti di impiego delle macchine: un robot in grado di spostare o lavorare la materia influenzerà diverse fasi del sistema edilizio, a seconda che esso venga impiegato in officina o in cantiere (Bock, 2016). Questa trasformazione comporta un cambiamento del significato di termini come "industrializzazione" e "prefabbricazione", in funzione delle nuove linee di produzione sempre più flessibili, rivolte alla customizzazione del prodotto e allo sviluppo di prodotti su misura e a progetto. Un'analoga trasformazione coinvolge anche la definizione della qualità del manufatto edilizio[3] e riguarda il ragionamento attorno al progetto, mutando infatti anche le idee che si sono storicamente affermate attraverso la sperimentazione e l'impiego di macchine e di processi costruttivi oramai non più innovativi e spesso considerati obsoleti (Gramazio e Kohler, 2014, p. 113) come, ad esempio, le produzioni standardizzate di elementi in calcestruzzo armato ad uso civile, pensati per rispondere ai bisogni di molti in modo univoco.

Oggi l'automazione si presenta in differenti forme, ridefinisce i processi architettonici a partire dalla progettazione, crea un nuovo tessuto di relazioni, in cui non sempre è possibile distinguere il progettista dal produttore (Micelli, 2011). Concetti e processi propri dell'artigiano vengono riportati nell'architettura e rielaborati attraverso la dimensione digitale.

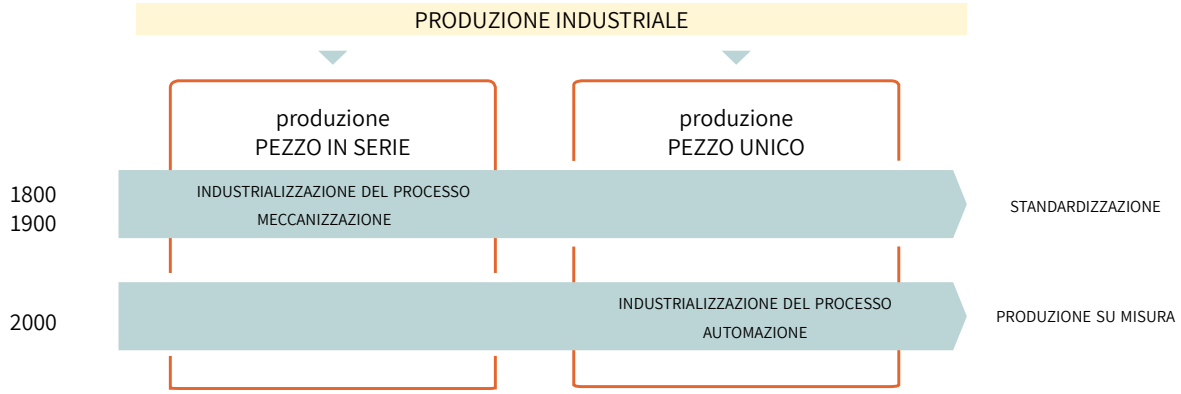
2.1 L'industrializzazione e la prefabbricazione

Negli anni Cinquanta, l'industrializzazione (intesa come l'intensificazione della produzione) interessa il settore edile italiano che acquisisce i brevetti e le tecnologie della Francia che, a sua volta, aveva fatto dei processi industriali la chiave per la sperimentazione del calcestruzzo armato. Nel 1892 l'impresario francese François Hennebique (1842-1921) depositò il brevetto relativo alla produzione del cemento[4] e nei decenni successivi seguirono sperimentazioni di sistemi costruttivi basati sull'impiego di questo materiale, attraverso anche la prefabbricazione di elementi costruttivi come solette o pannelli. L'Italia del dopoguerra dovette fronteggiare una serie di emergenze, tra le quali la rivitalizzazione dei territori distrutti e la realizzazione di nuovi alloggi. La ricostruzione rappresentò una sfida ma anche un'occasione di rilancio dell'industria, e per fare ciò si individuò nell'edilizia un ambito strategico in cui impegnare la manodopera non più assorbita dal settore bellico e i soldati di ritorno dal fronte. La strategia produttiva della prefabbricazione vide in questo contesto un'ampia possibilità di sviluppo, poiché permetteva di rispondere alla domanda (urgente) di alloggi pubblici e privati, in tempi rapidi, trasferendo le attività solitamente eseguite in cantiere, in officina. La prefabbricazione in Italia tuttavia troverà limitati sviluppi e sperimentazioni (Petrignani, 1965), concentrati soprattutto negli anni Sessanta: la crisi di questa strategia costruttiva è dovuta in parte alla mancata regolamentazione di tale processo, in cui ha dominato la speculazione invece che la qualità finale del manufatto[5], e in parte alla necessità di impiegare nel settore edile un grande numero di operai poco formati[6].

In Paesi come Francia o Russia, la prefabbricazione ha un ruolo centrale nella produzione edilizia mentre in Italia, a partire dagli Settanta "[…] l'industrializzazione edilizia, che continuava a trovare forti motivazioni nella scarsità e nell'aumento dei costi della manodopera, tendeva a trasferirsi dallo stabilimento al cantiere. Una serie di saperi e di tecniche già messe a punto nel decennio precedente in particolare in Francia, le tecniche del getto del calcestruzzo in stabilimento, lasciava il posto all'organizzazione del cantiere di costruzione: le casseforme fisse in linea del vecchio stabilimento di prefabbricazione scomparivano a favore di casseforme mobili, trasportabili nei singoli luoghi di intervento" (Sinopoli, 2002, p. 33).

L'industrializzazione edilizia, introducendo l'impiego di grandi quantità di elementi prodotti in stabilimento e assemblati in cantiere, trasforma l'attività di progettazione e ridefinisce i sistemi di assemblaggio e l'organizzazione del lavoro a piè d'opera (Nardi, 1992, p. 44). L'industrializzazione razionalizza un processo che già era proprio del settore edile, quello della prefabbricazione intesa come un processo di produzione artigianale e in serie di elementi, si pensi ai componenti più piccoli, come le aste in legno per il *balloon frame*[7], oppure ai mattoni realizzati a mano, con stampi in legno. L'industrializzazione, attraverso l'impiego di macchine utensili movimentate da una fonte di energia efficiente (né umana, né animale) e attraverso la razionalizzazione del processo di lavorazione, porta a una forma di prefabbricazione più evoluta e alla produzione in serie, prima di semplici componenti e in seguito anche di unità più complesse. Si tratta della stessa produzione in serie che Giuseppe Ciribini definisce come "volontà ripetitiva", slegata dalla quantità, quindi dalla piccola alla grande serie, ma comunque "volta a conseguire l'obiettivo della massima efficienza" (Ciribini, 1965, p. 19).

I termini "prefabbricazione" e "industrializzazione", definiscono concetti



01. La trasformazione della produzione industriale in relazione alle caratteristiche degli strumenti e dei processi disponibili, come la meccanizzazione e l'automazione. I processi supportano obiettivi differenti, da un lato la standardizzazione della produzione dall'altro invece la produzione su misura.

tra loro correlati ma non identici: sono processi indipendenti tra loro[8] (Nardi, 1980), la cui integrazione ha permesso il potenziamento reciproco. L'industrializzazione ha consentito di ottimizzare i processi di prefabbricazione condotti in forma semi-artigianale e di incrementare la produzione standardizzata in termini di quantità e qualità, poiché il gesto produttivo di una macchina può essere ripetuto sempre più rapidamente e più precisamente. La produzione in serie, o standardizzazione, viene qui intesa quindi come una produzione che avviene in condizioni di massima efficacia operativa. Successivamente, attraverso l'automazione avanzata del gesto produttivo, la produzione in serie potrà essere diversificata e avvicinarsi ad una logica produttiva più simile a quella artigianale, rivolta al prodotto su misura. Oggi quindi la logica di produzione non è più legata alla standardizzazione in senso stretto, quella descritta da Ford con la celebre frase "Ogni cliente può avere una macchina verniciata di qualsiasi colore desideri purché sia nera"[9] (Ford, 1992, p.72). L'industria è in grado di lavorare attraverso forme di produzione customizzate, in cui il progetto di un bene è adeguato alle esigenze dei singoli clienti. E il successo della customizzazione mostra le potenzialità delle lavorazioni fatte industrialmente e seguendo il disegno di ogni singolo progetto, processo attraverso il quale ogni cliente avrà un prodotto unico, e non un prodotto che è parte di una serie. La trasformazione delle lavorazioni industriali, in funzione dell'evoluzione degli strumenti di lavoro e degli obiettivi del lavoro stesso, si sviluppa attraverso gli ingegni e i saperi che appartengono in parte a chi sviluppa il progetto e in parte a chi organizza il lavoro dell'industria.

Guido Nardi descrive due possibili direzioni di sviluppo dell'industrializzazione (Nardi, 1980): quella per sistemi e subsistemi chiusi[10] e quella per componenti aperti[11]. Questa distinzione parte dall'analisi delle tipologie di elementi realizzati e, nell'esplicitazione delle due categorie, Nardi considera le opportunità e le complessità insite in ciascuna opzione e riflette nel merito della flessibilità di impiego dei componenti.

I **sistemi chiusi** prevedono che i componenti, prodotti in modo seriale, siano impiegabili in una sola specifica posizione all'interno di un sistema costruttivo. Vi sono esempi di progettazione per sistemi chiusi tra le opere sperimentali di Jean Prouvé, Walter Gropius, Konrad Wachsmann e Buckminster



02. Walter Gropius e Konrad Wachsmann in cantiere durante il montaggio di un modello di Packaged House System (1942-1952). Harvard Art Museums/Busch-Reisinger Museum, Gift of Walter Gropius.

Fuller; il caso aziendale della Lustron Corporation oltrepassa il confine tra prototipazione e industrializzazione ed evidenzia le difficoltà che la prefabbricazione per sistemi chiusi incontra. Tutti questi esempi risalgono agli anni tra il 1930 e il 1950, epoca in cui si riponeva fiducia nella produzione in serie che caratterizzava i processi automobilistici e aeronautici, una forma di fabbricazione che si auspicava potesse essere applicata a ogni tipo di prodotto, anche delle abitazioni. La fiducia in questa forma di progettazione e nella produzione seriale ha rappresentato il più utile degli strumenti per ottimizzare la progettazione e la realizzazione di componenti, che divennero via via più complessi fino a consentire di assemblare intere unità abitative. In alcuni casi era lo Stato a investire in tale direzione e i finanziamenti pubblici consentirono la nascita (e anche una rapida morte) di alcune realtà aziendali, come la Lustron Corporation. In altri casi le costruzioni sperimentali erano frutto dell'impegno di committenti privati e dello spirito di iniziativa dei progettisti che sceglievano di considerare l'industrializzazione come una componente fondamentale del processo architettonico, come nel caso di Konrad Wachsmann (1901-1980) e Walter Gropius (1883-1969) con la General Panel Corporation (fig. 02).

GENERAL PANEL CORPORATION

5. Incollaggio ad alta frequenza dei profili e dei telai (non eseguito)

6. Frese per realizzare le aperture

7. Frese automatiche per l'intaglio

8. Fresa per le parti terminali

9. Macchine automatiche per l'introduzione delle parti metalliche di congiunzione negli intagli

10. Macchine micrometriche bilaterali per la spalmatura del collante sintetico

11. Banchi di montaggio con gli impianti trasportatori

12. Posto di controllo centrale di tutto l'impianto automatico di fabbricazione

13. Presse con i generatori ad alta frequenza

14. Impianto di verniciatura a spruzzo

15. Trasporto del prodotto finito nel magazzino

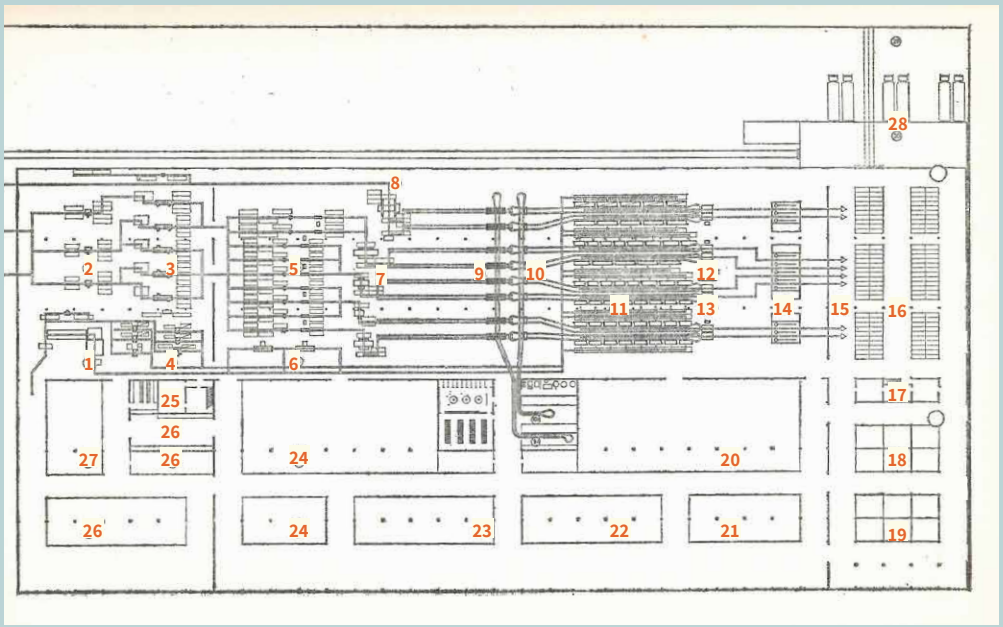
28. Argano e piano di caricamento

4. Macchine per il taglio del compensato in misure speciali

3. Profilatrici automatiche

2. Seghe circolari e a pendolo

1. Macchina automatica per il taglio dei pannelli di compensato



16. Magazzino per pannelli dei pavimenti, delle pareti, dei soffitti, dei tetti ed altri elementi di costruzione complementari

17. Ufficio personale

18. Montaggio di finestre e porte in alluminio

19. Deposito dei mobili a muro

20. Deposito di materiali per isolamento

27. Posto di pronto soccorso

26. Officina per riparazioni e deposito degli attrezzi

25. Materiale di imballaggio

24. Deposito materiale: legname pregiato, legno compensato

23. Produzione mobili a muro

22. Montaggio dei mobili a muro

21. Produzione delle unità standard contenente gli impianti

Progetto dello stabilimento General Panel in California, 1946 (Wachsmann, 1960).

Il 12 settembre del 1942 viene registrata a New York la General Panel Corporation: tale corporazione che consentiva di costruire unità abitative, attraverso l'importazione di elementi o la loro lavorazione, seguendo l'intero iter dalla progettazione alla produzione e installazione. La corporazione era costituita da Roy Plaut, Jack Marqusee, Halsey Josephson, che vollero investire sul progetto di W. Gropius e K. Wachsmann. Sebbene quest'ultimo perseguisse una continua ricerca sul perfezionamento del giunto aperto da utilizzare per il collegamento degli elementi del sistema della Packaged House, nel febbraio del 1943 (a cinque mesi dalla fondazione della corporazione), venne presentato il primo modello di abitazione. Alla presentazione Gropius invitò esponenti del Governo, dell'industria e dell'esercito, dimostrando come potesse essere possibile realizzare un'abitazione di qualità in un solo giorno. L'esperienza della General Panel tuttavia non ebbe successo sul mercato e gradualmente il progetto fu abbandonato: da un lato l'investimento iniziale non era stato sufficiente a promuovere il progetto, dall'altro la General Panel non investì nei nuovi progetti di collegamento sviluppati da Wachsmann, poiché avrebbero richiesto tempi lunghi per il brevetto e quindi l'utilizzo nel mercato. Il progetto prevedeva il superamento del giunto a forma Y e introduceva quello a J: la Atlas Aircraft Products Corporation si mostrò interessata ad acquisire il progetto, così Wachsmann scelse di dedicare la propria attività allo sviluppo del giunto a J, che consegno nel 1945.

Errori nella gestione dei finanziamenti e degli investimenti, rallentarono la General Panel che non fu in grado di sfruttare il potenziale mercato delle abitazioni del secondo dopoguerra.

Negli anni successivi la General Panel Corporation fu rilevata da differenti società e furono realizzati stabilimenti anche in altri paesi degli Stati Uniti, come in California nel 1946.

Le difficoltà economiche, legate anche a problemi di gestione, continuarono e nel 1950 la General Panel Corporation fu costretta a chiudere.

La fiducia e la sperimentazione in questo settore non trova però successo tra il pubblico perché non rispecchia i bisogni sociali dell'epoca[12], e ciò porta al graduale fallimento delle imprese da poco nate (Neri, 2015): il "fervido desiderio di convertire l'architettura moderna in una merce" (Kieran e Timberlake, 2004) si scontra con la mancanza di mediare le posizioni della domanda e dell'offerta e con l'eccessiva concentrazione su un tipo specifico di edificio, l'abitazione. Le soluzioni proposte erano troppo ripetitive e rigide, inadatte alle persone: "[Le Corbusier] pose una forma pura per ogni tipo di produzione come il minimo comune denominatore di design e fabbricazione. [...] Ha riconosciuto che il 'giusto stato d'animo' non esisteva allora per la sua nuova architettura iterativa, prodotta in serie, ma prevedeva che ci sarebbero voluti solo 20 anni perché questa trasformazione nei metodi razionali di costruzione si realizzasse. Lui aveva ragione. È successo, ma lo spirito di vivere nelle case prodotte in massa, non lo ha fatto" (Kieran e Timberlake, 2004, p. 109).

Osservando il lavoro di Wachsmann, si nota come egli fosse riuscito a sviluppare un connettore che permettesse di assemblare una serie di pannelli prefabbricati in legno in modo flessibile all'interno del sistema tecnologico progettato (fig. 05). Si trattava di una flessibilità limitata, che garantiva variazioni solo all'interno di un sistema ben definito, ad esempio per la realizzazione di una linea di modelli di unità abitative definibile come un sistema chiuso. Questo esempio mostra come sia complesso definire il confine tra "sistema chiuso" e "sistema aperto" e come tale confine sia sostanzialmente determinabile in virtù della fortuna che ebbero sul mercato le innovazioni tecnologiche ideate dai progettisti e dagli sviluppatori dei singoli elementi di costruzione.

Dopo le prime sperimentazioni, l'industria edilizia si orientò verso la **prefabbricazione aperta** e rivolse le proprie attenzioni verso elementi dalle dimensioni ridotte e componenti semplici: si passò dallo sviluppo di complesse unità (come le abitazioni) alla progettazione di parti di queste o di elementi composti e semilavorati. In questo modo fu possibile ipotizzare un gran numero di disposizioni per ogni elemento prodotto dall'industria, utilizzabile per realizzare svariate e differenti soluzioni progettuali. La prefabbricazione aperta lavora affinché ogni elementi uscito dalla linea di produzione possa essere posto in opera al fine di sviluppare differenti realizzazioni e sia possibile utilizzare gli stessi prodotti in differenti contesti. Tali prodotti sono comunque subordinati ai vincoli dimensionali dei macchinari produttivi utilizzati in azienda e, per trovare compatibilità all'interno di un sistema di soluzioni proposte da realtà produttive differenti, fanno riferimento al soddisfacimento degli standard edilizi: un pannello di rivestimento, ad esempio, poteva essere multiplo o sottomultiplo del modulo standard, la cui ripetizione consentiva il completamento dell'opera. La prefabbricazione risponde a progetti che anticipano la domanda del cliente, proprio come un processo industriale: l'interesse a sviluppare una prefabbricazione sempre più aperta invece che chiusa, consentiva di produrre maggiori combinazioni di assemblaggio, in cui prendeva forma quello che Ezio Fraiteli definisce con il termine metaprogetto, cioè lo "studio di un sistema mobile di relazioni in una struttura variabile di assemblaggio" (Fraiteli, 1973, p. 58). Cresce il numero di aziende specializzate nella produzione di componenti strutturali (come profili in acciaio laminati a caldo o prefabbricati in calcestruzzo), di componenti di rivestimento (come lamiere in metallo e doghe in legno) e nel frattempo venivano sperimentati differenti e nuovi materiali per realizzare prodotti sempre più performanti (come nel campo dell'isolamento termico e

dell'impermeabilizzazione). Si possono distinguere due grandezze all'interno della strategia della prefabbricazione aperta, in riferimento alla dimensione e al peso del componente prefabbricato prodotto: la prefabbricazione leggera e quella pesante, ciascuna delle quali necessita di impiegare macchinari *ad hoc* per la movimentazione dei pezzi all'interno del cantiere.

2.2 L'industrializzazione edilizia in Italia

In Italia, dai primi anni del Novecento, si iniziano a sviluppare sistemi prefabbricati realizzati in calcestruzzo armato: piccoli componenti strutturali per solai ed elevazioni ma anche sistemi più complessi, come quelli sperimentati da Pierluigi Nervi e da Angelo Mangiarotti. L'impiego di prefabbricati in calcestruzzo si diffonderà a partire dagli anni Sessanta anche grazie alla crescente meccanizzazione del cantiere, che permetteva di movimentare parti pesanti e velocizzare le procedure di manodopera, riducendone i costi: l'impiego di questi strumenti contribuiva a spostare i processi di prefabbricazione dall'officina al cantiere e consentiva, ad esempio, di eseguire tutte le fasi di montaggio a terra e non più in quota, movimentando e assemblando la parte finita tramite l'ausilio di macchinari.

I prefabbricati in calcestruzzo trovarono applicazione nella realizzazione di abitazioni ma, per restare entro i limiti economici di convenienza, era necessario lavorare a grandi complessi. Sia i sistemi tridimensionali gettati in opera[13] che i sistemi prefabbricati a pannelli[14] (e i rispettivi sistemi di collegamento), si rivelarono troppo vincolanti per uno sviluppo convincente del progetto architettonico[15] e, al contempo, non garantivano finiture adeguate alle esigenze degli utenti. La delusione dei progettisti si può misurare nelle parole di Guido Nardi: "[…] i dubbi maggiori sulla prefabbricazione sono soprattutto di ordine formale: il concetto di serialità, di ripetizione di un elemento sempre uguale, ritenuti propri di un processo di industrializzazione, inducono a formulare l'equazione prefabbricazione-uguale-monotonia" (Nardi, 1992, p. 43). Il passare del tempo mostrò anche che tali sistemi erano difficili da integrare con gli impianti di più recente sviluppo, che era pressoché impossibile intervenire con opere di manutenzione sulle canalizzazioni che erano state annegate nelle gettate e che l'organizzazione spaziale degli alloggi risultava eccessivamente vincolata dall'invadente presenza degli elementi portanti, molto più numerosi degli elementi portati (che si possono facilmente rimuovere o demolire per trasformare gli alloggi o alcune parti di essi).

La prefabbricazione divenne, per i vantaggi promessi e le potenzialità intrinseche, uno dei temi principali del dibattito intorno all'architettura italiana: nel 1962 a Milano si svolse il *Primo Congresso internazionale della prefabbricazione* e nel 1964 venne inaugurata a Bologna la prima edizione del SAIE, il S*alone Internazionale dell'Edilizia*, che costituirà per anni il luogo e l'occasione di incontro e di confronto per produttori e progettisti. Si sviluppò attorno alla prefabbricazione un forte dibattito e le pubblicazioni, le testate giornalistiche e i convegni ne testimoniano l'interesse: da un lato emerge la delusione nei confronti della prefabbricazione pesante, dall'altro alcuni progettisti riconoscono nei limiti imposti dai processi di industrializzazione uno stimolo per lo sviluppo di nuovi progetti. In questo contesto, spiccano i nomi di Angelo Mangiarotti, Vittorio Gregotti, Bruno Morassuti e Ignazio Gardella, alcuni degli architetti che hanno

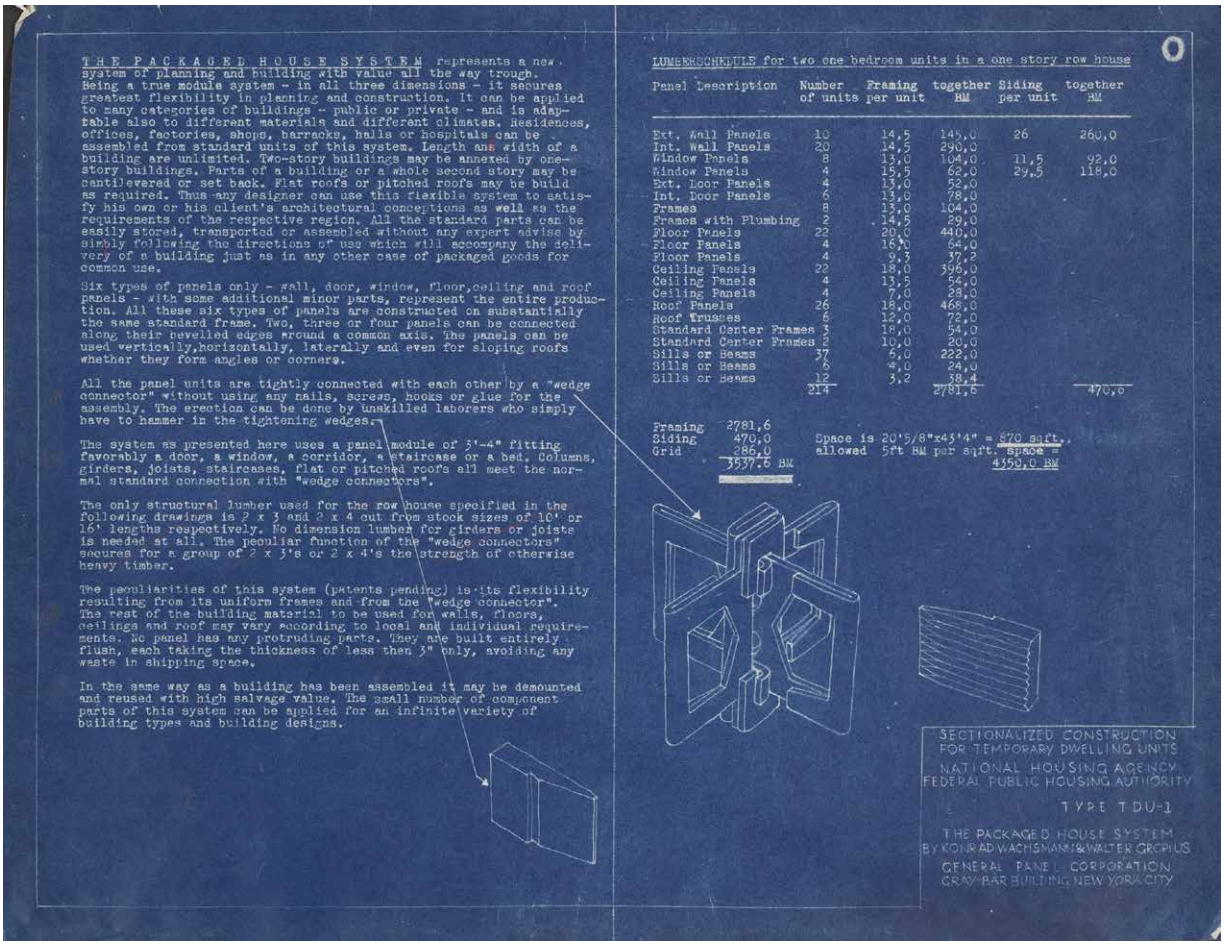
sviluppato e impiegato sistemi di prefabbricazione nel contesto italiano, soprattutto per la realizzazione di strutture pubbliche. Si tratta di progetti che descrivono una costante ricerca nell'impiego dell'industrializzazione come una parte del processo progettuale e quindi la ricerca e il dialogo con la produzione, tesa a produrre componenti appropriati al progetto da realizzare. Tra gli esempi più noti, gli elementi strutturali in calcestruzzo precompresso progettati da Angelo Mangiarotti per gli stabilimenti della ditta ELMAG (1964, Lissone): travi, pilastri e tegoli di copertura, assemblati, davano forma a un particolare telaio denominato FACEP FM; o ancora i pannelli di tamponamento in calcestruzzo e legno per le residenze in via Quadronno a Milano (1960) dove Mangiarotti, con Bruno Morassuti, sviluppò tre tipologie del FACEP (fig. 03) attraverso lo sviluppo di un sistema di collegamento che garantiva l'intercambiabilità tra le parti, in funzione delle richieste dell'utente dell'alloggio (Campioli, 2017). Ignazio Gardella progetta una serie di unità abitative per edifici residenziali che, grazie al disegno basato su moduli, rendono possibile lo sviluppo di un processo produttivo prefabbricato. Si tratta quindi di ricerche progettuali che trovano nell'industrializzazione prima di tutto la possibilità di avvicinare la produzione al progetto, e non tanto un'imposizione della monotonia e della ripetitività sulla tecnica.



03. Residenze in via Quadronno a Milano (1960), di Angelo Mangiarotti e Bruno Morassuti. Facciata composta con il modello FACEP sviluppato in tre tipologie: loggia, finestrato, tamponato con elementi in legno. Francesca Castanò.

Più numerose furono le applicazioni e gli sviluppi progettuali fondati sull'impiego della prefabbricazione aperta e leggera, fatta di parti più o meno complesse e tra loro assemblabili. Nel 1968, in occasione della IV edizione del Salone SAIE, l'Ente Autonomo per le Fiere di Bologna e l'Associazione Italiana Prefabbricazione per l'edilizia industrializzata organizzarono la mostra *Il componenting* che raccogliesse esempi e considerazioni in merito all'integrazione tra progettazione e produzione industrializzata. L'obiettivo era mettere in evidenza i caratteri propri dello processo che ha origine da tale integrazione e che Ciribini, in riferimento alla politica del "Component Approach" adottata in quegli anni dal governo britannico, denominò appunto **componenting**. Nel testo edito in occasione della mostra, si legge che tale processo corrisponde alla capacità di "offrire ad una domanda effettiva o potenziale risposte in termini di componenti edili ancora soggetti ad una normazione generale dimensionale qualitativa, ma coordinati in diversi sistemi costruttivi" (Ciribini, 1968, p.13): tale coordinazione sussiste esclusivamente in relazione ad una normalizzazione della produzione, vale a dire ad una definizione di valori standard utili a descrivere la dimensione degli elementi e dei sistemi di collegamento. In questo modo i produttori avrebbero potuto sviluppare sistemi costruttivi prefabbricati essendo certi dell'integrazione tra le parti realizzate da altri produttori e organizzandosi in consorzi a garanzia della convenienza degli investimenti volti all'innovazione industriale e qualità degli edifici finiti, sia al confronto con i progettisti che con gli utenti finali (Franco *et al*., 1968, p. 16).

Le connessioni, che da sempre hanno una parte rilevante nel progetto e nella produzione dei materiali da costruzione, divengono il luogo in cui esprimere il valore architettonico del progetto, sia per la loro funzione e che per il carattere estetico che possono conferire all'architettura (Frateili, 1967, p. 18; Nardi, 1992, p. 61). L'architetto statunitense di origini tedesche Wachsmann, ha fatto del giunto di collegamento tra elementi il cardine di una vera e propria "cultura dei prodotti assemblati nelle relazioni" (Nardi, 1992)[16]. Prima collaboratore di Gropius e poi suo socio nell'azienda General Panel Corporation in America, Wachsmann dedica la propria ricerca[17] alle relazioni tra i componenti edili, con l'obiettivo di garantire il carattere di intercambiabilità delle aste strutturali per la realizzazione delle unità abitative della Packaged House e di sfruttare al meglio



05. Dettaglio del giunto per le unità abitative della Packaged House (1942-1952). Il collegamento è stato sviluppato da Konrad Wachsmann, con l'obiettivo di realizzare un giunto componibile, realizzato attraverso l'assemblaggio di più parti prodotte serialmente. Harvard Art Museums/Busch-Reisinger Museum, Gift of Walter Gropius.

il processo produttivo industriale (fig. 05). L'obiettivo era quello di realizzare un connettore universale, adatto a differenti modalità di impiego, al fine rendere flessibile anche l'installazione dell'elemento strutturale (nello specifico, l'asta in metallo). Il connettore è costituito da più parti in metallo che sono tra loro assemblabili rendendo il connettore trasformabile e variamente inseribile all'interno del sistema costruttivo; allo stesso tempo, ciascuna parte del connettore è standardizzata e può sfruttare le potenzialità del sistema industriale, una componente fondamentale nel processo architettonico della Packaged House.

In relazione alla prefabbricazione aperta, la progettazione del giunto doveva soddisfare due requisiti principali: l'intercambiabilità, per permettere a ogni elemento di essere inserito in più punti e non necessariamente in una posizione specifica all'interno del sistema costruttivo dato, e la neutralità formale, per non incidere sull'immagine finale del manufatto e lasciare al progettista la possibilità di definire l'aspetto del componente senza i vincoli imposti dagli spessori e dalle forme dei giunti[18]. I collegamenti progettati con una morfologia caratterizzante assumono un ruolo all'interno del progetto, mentre "i componenti disponibili ad assumere

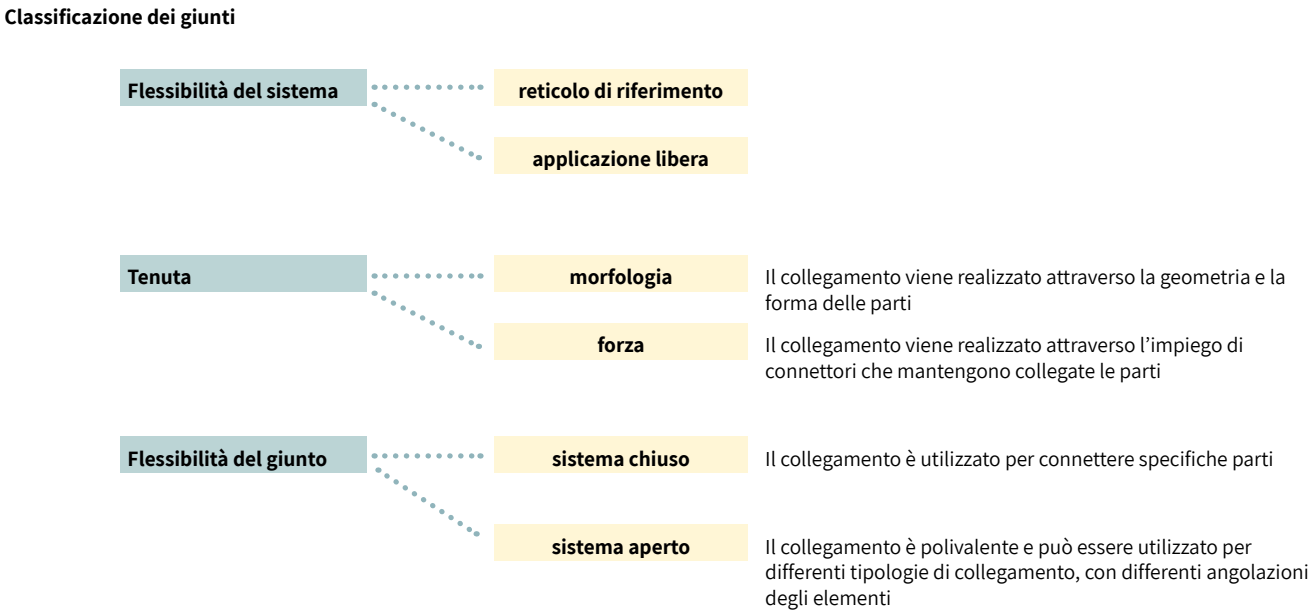
configurazioni combinatorie aperte, sono elementi non significanti che si disperdono nella struttura generale della costruzione a cui sono destinati, determinandola solo come materialità senza partecipazione semantica. Spetterà quindi all'architetto e alla sua capacità conferire un'aggiunta di significato" (Nardi, 1992, p. 60).

Per rispettare il principio di intercambiabilità nel processo di componenting, si prediligeva una tipologia di giunto a secco e non a umido, questo poteva essere progettato e realizzato come una parte dell'elemento da connettere oppure poteva essere un elemento indipendente. In entrambi i casi la progettazione della connessione avveniva prima della posa in opera e non era ideata ed effettuata direttamente in cantiere, come avveniva nella stragrande maggioranza delle costruzioni tradizionali realizzate a umido: in questo modo la progettazione della connessione diviene importante, quanto o più quella dell'elemento, poiché determina l'intercambiabilità delle parti (Franco *et al*., 1968, p. 39) e quindi il carattere flessibile proprio della prefabbricazione aperta e del componenting.

La razionalizzazione della produzione negli anni '60 e '70 viene considerata come un valore aggiunto alla progettazione, tuttavia questa fiducia divenne ben presto cieca: "[le tecniche esecutive negli anni '70] vengono infatti considerate una questione marginale per la rifondazione disciplinare e professionale. Questo atteggiamento è reso possibile perché si ritiene, erroneamente, che le possibilità tecniche siano esuberanti rispetto alle esigenze della forma: per raggiungere l'obiettivo, si pensa che si possano adottare indistintamente diverse tecniche, tutte adatte, e nello stesso tempo nessuna determinante. Questa valutazione sottende un'implicita delega per la risoluzione dei problemi tecnici ad altri campi: il progettista tende a demandare al rappresentante commerciale per i piccoli lavori, o direttamente agli uffici tecnici delle imprese o alle società di ingegneria, per i grandi lavori, il collegamento fra attività ideativa e attività esecutiva" (Nardi, 1992, p. 63). Ciò accade ancora oggi, qualora i progettisti si affidino agli uffici tecnici non per una consulenza, bensì per delegare la progettazione esecutiva, con importanti ripercussioni sul progetto edilizio finale. Una pratica consolidata dagli appalti pubblici, dove la progettazione architettonica e la direzione lavori non sono sempre coordinate dallo stesso progettista.

L'industrializzazione dei sistemi produttivi edili ha contribuito a ridefinire il ruolo delle imprese all'interno del processo architettonico che, nel corso degli anni '80 e '90 del Novecento, hanno cercato di specializzarsi su particolari sistemi costruttivi. Ciò è evidente nel settore del legno, che è stato tra i primi ad essere condizionato dall'industrializzazione e le cui imprese si sono oggi specializzate non solo nella produzione ma anche nella messa in opera degli elementi. Queste imprese, operando in funzione del settore industriale e quindi di un mercato formato da prodotti standardizzati, di semilavorati, di componenti e di macchine, offrono sempre più spesso "soluzioni a pacchetto" (Sinopoli, 1997): l'impresa costruttrice si allontana sempre più dallo stereotipo dell'impresa artigianale (piccola, familiare, locale o tradizionale) e, assomigliando sempre più ad una fabbrica di prodotti standardizzati, limita il numero delle varianti da gestire all'interno dello stabilimento e di conseguenza impone vincoli al progetto architettonico.

La produzione di soluzioni a pacchetto non si limita al settore del legno e neppure all'ambito delle strutture, è invece una tendenza che coinvolge l'intero comparto edilizio e che in qualche modo testimonia la ricerca e la volontà di adottare e diffondere i principi dell'industrializzazione e della produzione in serie. Ad accelerare questo progresso vi è la crescita della digitalizzazione, che permea l'intero processo progettuale e che influenza anche l'elaborazione del disegno. Risale



06. Ipotesi di classificazione dei giunti, principali aspetti (fonte "Il componenting" 1968).

al 1982 la prima versione di AutoCAD e nell'arco di pochi anni, attraverso la configurazione su PC, il software trova un ampio campo di applicazioni grazie alla riduzione dei tempi di calcolo e di misura e alla possibilità di modificare localmente i disegni senza compromettere l'intero elaborato grafico (come invece accadeva nel caso dei disegni realizzati a mano). Per queste principali ragioni AutoCAD divenne rapidamente il software per il disegno digitale più utilizzato al mondo.

L'implementazione dei software e dei sistemi digitali contribuiscono a rendere le linee di produzione sempre più autonome. In Italia ciò è evidente soprattutto osservando il comparto automobilistico: come testimonia l'azienda COMAU di Torino, oggi uno dei principali produttori di robot industriali al mondo e parte del gruppo FCA (*Fiat Chrysler Automobiles*); l'azienda nasce come Consorzio Macchine Utensili e raggruppa, nell'area torinese, i produttori e fornitori di componenti per le automobili VAZ di Togliatti, in Russia.

Lo sviluppo dell'industrializzazione nel settore edile, che per sua conformazione progredisce con tempi più lunghi, è stato rallentato ulteriormente dalla crisi economica del 2008, eco della bolla immobiliare e della conseguente bancarotta statunitense. In Italia gli investimenti nelle costruzioni si sono ridotti di circa il 36,5%[19], a danno soprattutto delle nuove costruzioni nel settore residenziale. In questi anni tuttavia sono emerse diverse eccezioni a questo andamento, con l'introduzione e lo sviluppo nel mercato di nuovi sistemi costruttivi e prodotti sempre più performanti, come testimonia il sistema X-Lam che ad oggi è adottato nel 45% delle nuove costruzioni in Italia[20]. Anche le sperimentazioni che fondano lo sviluppo del progetto sull'impiego di software e strumenti di ultima generazione si fanno più numerose, adottano bracci robotici e droni e sono testimoniate da installazioni quali l'alloggio stampato in calcestruzzo a Milano in occasione del Salone del Mobile 2018 (Locatelli, Arup, Italcementi), l'Armadillo Pavilion del gruppo di ricerca di Philippe Block e presentato alla 15° Biennale d'Architettura di Venezia (2016) o l'unità mobile di montaggio ROB ideata da Gramazio Kohler Research (ETH Zurigo) in occasione della 11° Biennale di Architettura di Venezia (2008). Pur trattandosi di esperimenti e di prototipi, la ricerca sta evidenziando le potenzialità dell'automazione in uno spettro di azioni e operazioni ampio come quello edile, con possibilità di

intervento nei campi della raccolta ed elaborazione dei dati, fino alle fasi di produzione e montaggio, contribuendo a costruire nuove prospettive di sviluppo per un settore in trasformazione.

2.3 La digitalizzazione del progetto

L'automazione in edilizia coinvolge gli ambiti della progettazione digitale e della trasmissione di dati, che comportano la capacità di monitorare e programmare, e ha una forte influenza anche sulle operazioni di tipo più materiale, che comprendono la produzione, la lavorazione e lo spostamento di materia, sia in cantiere che in fabbrica. L'automazione, nel momento in cui coinvolge il settore edile, si fa dunque doppiamente complessa e interviene in numerosi e differenti ambiti, ciascuno facente parte del più ampio processo edilizio, "un processo che coordina i processi, una tecnologia nell'organizzazione del mestiere dell'architettura" (Sinopoli, 1997); nonostante ciò, l'automazione viene troppo spesso ricondotta ed identificata con il lavoro compiuto dal braccio robotico e non viene considerata nelle sue numerose forme e applicazioni che prevedono l'utilizzo di software o di strumenti differenti dai robot.

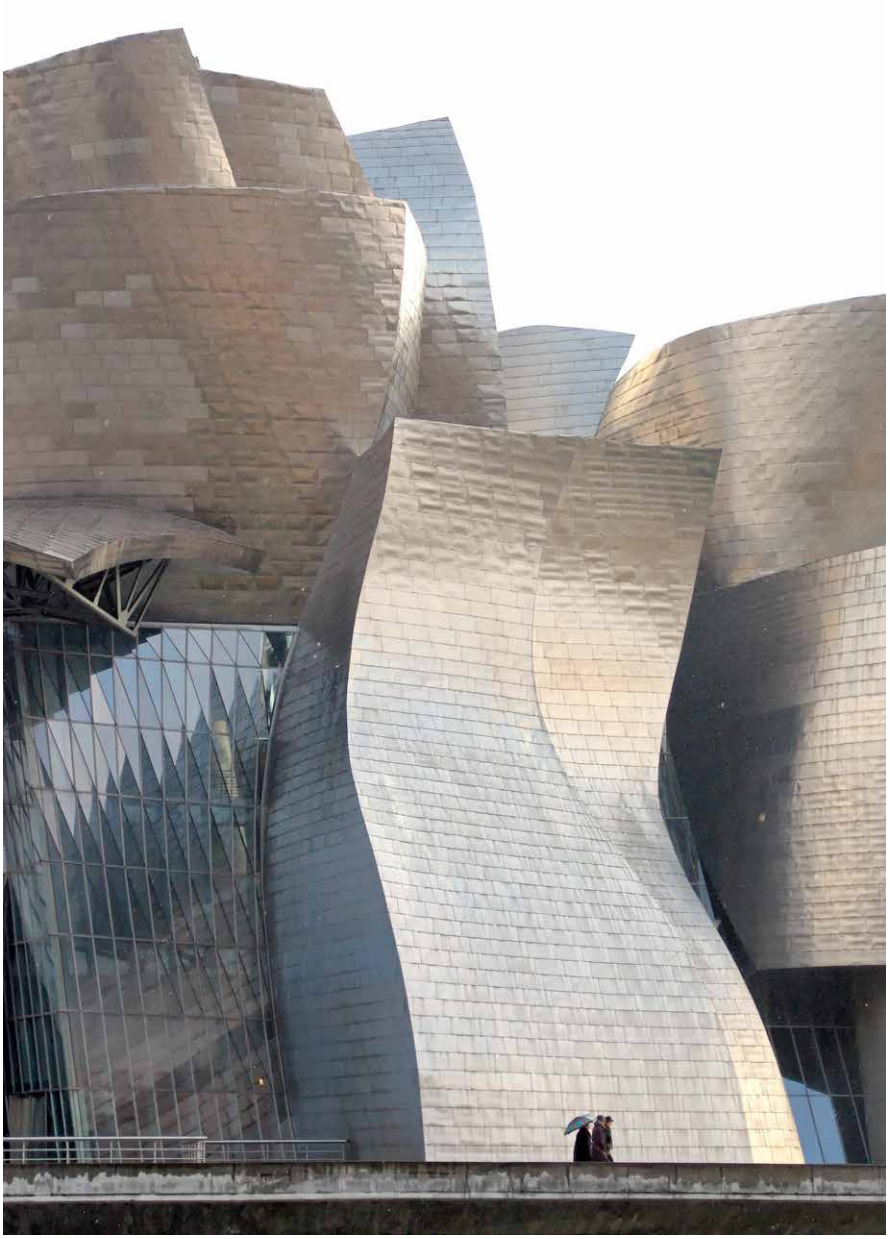
Tra i primi ambiti di impiego, la digitalizzazione ha ridefinito il disegno architettonico dal punto di vista delle funzioni e dei contenuti, superando i limiti imposti dai fogli di carta. Ciò ha avuto enormi ripercussioni sulla progettazione, basti pensare al valore della condivisione tra i tecnici e i progettisti delle informazioni contenute negli elaborati.

Nel 1963 Ivan Sutherland[21] creò il software Sketchpad, il primo di una serie di prodotti digitali volti migliorare l'interazione tra disegno e computer, il padre di programmi moderni quali il CAD (*Computer Aided Design*). Inizialmente i software CAD hanno permesso di controllare solo i principali aspetti formali del progetto (al pari dei disegni su carta), successivamente hanno trovato un più ampio sviluppo grazie all'interazione con i diversi campi dell'ingegneria che hanno connotato i software di funzioni utili a controllare altri parametri di progetto, ad esempio quello economico, meccanico o fisicotecnico.

Nel corso degli anni i vari e specifici software sono stati integrati tra loro e hanno contribuito a modificare ulteriormente l'informatizzazione del processo progettuale attraverso il *Building Information Modeling* (BIM). Il BIM non organizza lo sviluppo del progetto in un modo differente ma trasferisce sul piano digitale quella che è una pratica caratterizzante, affermata e necessaria per lo sviluppo di ogni progetto: la collaborazione tra gli specialisti, grazie al BIM, viene ridefinita nei tempi e l'iter procedurale, di conseguenza, viene trasformato dalla simultaneità e dall'interoperabilità delle mansioni e dei saperi che concorrono allo sviluppo di un progetto esecutivo. Il BIM crea un ambiente virtuale in cui tutti i parametri descrittivi del progetto sono legati e interrelati tra loro: se viene effettuata una variazione di tipo dimensionale, altri aspetti (ad esempio, la relazione areoilluminante) possono subire modifiche in modo automatico, in funzione di parametri prestabiliti (ad esempio, gli standard di legge) e ciò avviene simultaneamente qualora si operi su un unico modello da luoghi diversi e a partire da competenze e responsabilità diverse.

Il disegno digitale ha contribuito a ridefinire anche la morfologia dei componenti edili, strutturali e non. Grazie alla parallela evoluzione delle linee di produzione, come descritta nel capitolo precedente, è oggi possibile realizzare

07. Il Guggenheim Museum Bilbao, il museo di arte contemporanea progettato dall'architetto Frank O. Gehry.



elementi dalle geometrie sempre più complesse per dimensioni e morfologia, che possono essere articolate, irregolari e curve. Lo spazio digitale diventa il luogo in cui sperimentare: l'algoritmo matematico diventa la matrice attraverso la quale elaborare il modello virtuale del progetto, cioè un modello computazionale ottenuto dalla manipolazione di algoritmi matematici da parte del progettista.

Negli anni Novanta il nome di un programma di calcolo, il *Binari Large Object*, contribuisce a definire perfino un movimento architettonico, il così detto BLOB[22], testimoniando il crescente ruolo di un software digitale all'interno del processo architettonico; tale movimento si distingueva soprattutto per la particolarità delle superfici, composte da più curvature e governate proprio grazie a specifici algoritmi. Ciò che è più rilevante è la gamma di possibilità che i programmi di calcolo offrono ai progettisti, rendendo esecutive e tangibili le idee più complesse e talvolta anche contorte, nel senso stretto del termine.

Il Guggenheim Museum di Bilbao (1998) (fig. 08) è stato ideato da Frank Gehry a partire dallo sviluppo di un plastico che è stato trasformato in elaborati di progetto e in dettagli esecutivi attraverso il lavoro di un team di ingegne-

ri che ha impiegato avanzati software di calcolo, tra cui Catia un software di calcolo impiegato all'epoca nell'industria aerospaziale. Il progetto di Gehry è il simbolo di come, dagli anni Novanta ad oggi, la rappresentazione geometrica tridimensionale di forme libere si sia fatta relativamente più semplice e quindi praticabile (Carpo, 2011, p. 37).

2.4 L'automazione della produzione

La realizzabilità delle architetture complesse (come e più del Guggenheim di Bilbao) sta all'ingegno dei progettisti ed è funzione delle evoluzioni tecnologiche nel campo del disegno digitale e della produzione materiale, le cui trasformazioni sono strettamente correlate le une alle altre. Gli aspetti legati alla produzione materiale sono vari e, oltre alla lavorazione dei prodotti attraverso l'addizione e/o la sottrazione di materia, includono anche lo spostamento e l'assemblaggio di elementi semplici e/o unità tecnologiche complesse. L'automazione per la produzione materiale, sebbene abbia un carattere più meccanico se confrontata con il disegno delle architetture, coinvolge numerosi saperi e competenze e ricalca lo schema procedurale descritto per la progettazione. La produzione materiale fa ampio uso di sensori[23]: la precisione di una macchina o di un robot non può essere definita solamente in relazione alla qualità dell'utensile, ma è anche funzione delle possibilità e dell'efficacia di manovra. L'ingegnere Thomas Bock[24], esperto di automazione nelle costruzioni, ritiene che l'automazione sia un processo capace di coinvolgere il settore edile *tout court*, dall'assemblaggio alla modellazione e la sua esperienza in Giappone è volta allo sviluppo della robotica collaborativa: strumenti capaci di lavorare insieme all'uomo senza costituire un pericolo e sollevando la manodopera dallo svolgere operazioni pericolose. La robotica collaborativa descritta da Thomas Bock è rivolta soprattutto alla costruzione in cantiere[25], che costituisce la fase più delicata del processo di realizzazione di un'architettura. I robot più impiegati, in questo specifico ambito, detti *Single Task Construction Robot* (STCR), sono in grado di svolgere un lavoro specifico e vengono impiegati in particolare per aiutare i lavoratori nella movimentazione di materiale pesante o in operazioni poco sicure (fig. 08). Gli STCR possono lavorare per livellare o rifinire calcestruzzo, per posizionare elementi pericolosi o per l'installazione di facciate; la progressione delle innovazioni e delle sperimentazioni consente di realizzare anche robot per la manutenzione e l'ispezione, o per il riciclaggio, e la tecnologia avanzata consente alle macchine di riconoscere le condizioni dell'ambiente al fine di operare in uno specifico edificio o sistema; in questo modo i robot possono essere impiegati anche per mantenere la pulizia in cantiere, che si traduce in maggiore sicurezza, migliore precisione nelle operazioni e qualità della costruzione. Lo sviluppo di sensori sempre più sofisticati permette ai robot di migliorare anche l'interazione con l'uomo, per garantirene l'incolumità: sono tecnologie sviluppate soprattutto per le operazioni in officina, ma che vengono poi trasferite in cantiere. E l'ambiente di cantiere, che si trasforma per accogliere tali innovazioni, appare sempre più strutturato: si realizzano telai temporanei, volti al supporto dei robot STCR e coperture per proteggere l'ambiente dalle intemperie e consentire di lavorare con continuità in un'area pulita e illuminata, più sicura per i lavoratori e i robot. Nei cantieri più complessi, esiste un'unità di controllo che coordina le macchine e solo pochi lavoratori operano sul posto[26]. Il crescente impiego di ro-

SINGLE TASK CONSTRUCTION ROBOT

Il termine Single Task Construction Robot (STCR) identifica quell'insieme di sistemi robotici che supportano i lavoratori in cantiere nell'esecuzione di una specifica attività di costruzione o assumono l'attività fisica dei lavoratori umani che sarebbe necessaria per eseguire questo compito (Bock, Linner, 2016).
Gli STCR sono specializzati nelle lavorazioni, quindi non sono strumenti intercambiabili: in qualità di robot di servizio, possono collaborare o sostituire la persona durante l'esecuzione della lavorazione. Gli STCR in funzione dell'attività possono avere differenti morfologie.
T. Bock e T. Linner definiscono 24 categorie di lavorazione per gli STCR: monitoraggio e misurazione della costruzione; scavo di fondazione; costruzione di elementi; movimentazione di parti; realizzazione di elementi tridimensionali in calcestruzzo; assemblaggio di elementi tridimensionali in acciaio; disposizione di mattoni; distribuzione del calcestruzzo; livellamento del calcestruzzo; finitura della superficie di calcestruzzo; logistica del cantiere; spostamento aereo di parti per assemblaggio; posizionamento di elementi; saldatura; installazione elementi di facciata; posizionamento piastrelle; stesura intonaco; esoscheletro per operaio; finiture interne; manutenzione e ispezione; recupero materiali.
La definizione STCR nasce nel contesto giapponese, il primo paese a impiegare la robotica per la costruzione in edilizia. Negli anni Ottanta infatti si costituiscono gruppi di ricerca ed enti statali che favoriscono l'utilizzo della robotica nei diversi processi edili, tra cui si ricordano JARA Japan Industrial Robot Association (1978) e WASCOR Waseda Construction Robot group (1985); nel 1983 inoltre AIJ Architectural Institute of Japan costituì il primo gruppo di ricerca per l'automazione in cantiere.



08. STCR per la saldatura del giunto tra due colonne, operazione in situ. Goyo/Penta Ocean, Thomas Bock

bot nel montaggio determina anche una possibile riprogettazione dei prodotti e dei componenti oltre che una nuova definizione dei processi di assemblaggio, migliorati in considerazione di una nuova ergonomia non più esclusivamente umana ma riferita al rapporto tra i bracci sia umani che robotici operativi in cantiere. Il design orientato al robot[27] mira "a ridurre la complessità del processo di assemblaggio mediante la diminuzione delle parti e la riprogettazione delle strutture dei componenti come prerequisito per l'applicazione dell'automazione e della robotica nel cantiere"(Bock, 1989)[28].

Considerando che l'automazione è finalizzata a potenziare e ad estendere le capacità umane, nel caso specifico del montaggio essa è volta ad un un miglioramento della precisione e della velocità di esecuzione garantendo al contempo una certa capacità di adattamento alle variabili. Nel caso della realizzazione della facciata del Gantenbein Vineyard (2005) l'impiego del robot è stato fondamentale, vista la precisione richiesta nel posizionamento di mattoni di misura omogenea secondo uno specifico disegno geometrico (Gramazio e Kohler, 2014, p. 185). In questo caso il materiale legante veniva depositato omogeneamente tramite un ugello sul mattone da installare: ma grazie alla possibilità di interfacciare sempre più facilmente i movimenti di un braccio robotico alle esigenze del progetto, anche i punti di collegamento vengono realizzati attraverso processi di automazione. Un altro caso interessante è Sequential Roof, probabilmente il primo esempio di robotica impiegata nell'intero processo di produzione e montaggio di una struttura di copertura. Questa architettura è stata realizzata per l'Arch-Tec- Lab dell'Istituto di tecnologia in architettura - ITA (Zurigo, 2016); è stata progettata e sviluppata attraverso la collaborazione di Gramazio Kohler Research all'ETH di Zurigo, Arch-Tec-Lab AG, Dr. Luechinger + Meyer Bauingenieure AG, ROB Technologies AG e prodotta da ERNE AG Holzbau. La copertura è composta da 168 capriate realizzate con doghe in legno, tagliate, posizionate e inchiodate tramite una grande macchina CNC installata su una gru a cavalletto: grazie ai 6 gradi di libertà del mandrino e alla configurazione dei software di calcolo e di lavorazione, è stata realizzata una copertura di oltre 2.300 mq con 48.624 doghe in legno.

L'automazione meccanica applicata alla modellazione dei materiali e alla produzione dei componenti ha la possibilità di ridefinire la progettazione degli stessi e

Gantenbein Vineyard Façade
Fläsch, Svizzera 2006
Bearth & Deplazes Architekten, Gramazio Kohler Research





Il progetto della cantina Gantenbein ad opera di Bearth & Deplazes Architekten, Gramazio Kohler Research, riguarda l'ampliamento di una cantina preesistente. Si tratta di un corpo strutturato su 3 livelli, che raccoglie differenti funzioni al suo interno: al piano terra l'imbottigliamento e l'etichettatura; al primo piano la schiacciamento dell'uva; al secondo piano gli spazi di rappresentanza e la terrazza. Spazi che richiedono differenti gradi di luminosità e di temperatura. Il progetto ha portato alla realizzazione di uno scheletro in cemento armato e un tamponamento in laterizio, attraverso il quale però poter filtrare la luce, soprattutto all'interno del primo piano, dove sono disposte le botti per la pressatura e, nella zona interna e protetta, per la fermentazione.
Il metodo di produzione robotizzato viene utilizzato per realizzare gli elementi di tamponamento, attraverso una particolare disposizione dei mattoni, così complessa che l'uomo avrebbe richiesto molte più ore nel montaggio. La disposizione dei mattoni consente di realizzare una parete in grado di filtrare la luce all'interno dell'ambiente, a sua volta integrata da pannelli in policarbonato montati all'interno per proteggere il vino dal vento e dalle intemperie.
La disposizione dei mattoni è stata eseguita secondo uno specifico modello computazionale: le facciate dell'edificio riproducono infatti degli acini d'uva, attraverso un bassorilievo realizzato proprio attraverso l'angolazione e la disposizione dei mattoni. L'edificio della cantina sembra una grande cesto d'uva, la cui superficie varia la propria luminosità e i punti d'ombra a seconda di dove lo spettatore si posiziona e della luce. Si tratta di una percezione più complessa rispetto a quella bidimensionale dove può risaltare l'effetto cromatico: in questo caso la percezione è costruita attraverso le differenti inclinazioni dei mattoni.
È stato realizzato un metodo di produzione robotico presso l'unità di ricerca Gra-

Da sopra. Vista interno del primo piano, la luce esterna filtra attraverso i giunti creati dalla disposizione dei mattoni in facciata. Ralph Feiner
Vista interna di uno dei 72 elementi parete, prima dell'installazione del pannello di policarbonato interno; riproduzione grafica del concept del progetto, ovvero gli acini d'uva contenuti all'interno disegnano la superficie della facciata. GKR

mazio Kohler all'ETH di Zurigo, attraverso il quale è stato possibile disporre oltre 20.000 mattoni (240x115x61 mm) esattamente secondo i parametri programmati, all'angolazione desiderata e agli intervalli prescritti. I giunti tra i mattoni variano da un minimo di 2 mm a un massimo di 50,5 mm. L'assemblaggio dei mattoni è stato affidato a un braccio robotico, in grado di disporre correttamente il legante adesivo bicomponente e di posizionare all'interno dell'elemento di facciata il mattone, seguendo i comandi digitali del progetto. In laboratorio sono stati realizzati 72 elementi della facciata, che sono stati trasportati e installati successivamente in opera.
Sulla superficie di oltre 400 mq ogni mattone è disposto con una propria inclinazione e ha una sovrapposizione univoca con il mattone sottostante e quello accanto. Per questo motivo è stato elaborato un metodo ad hoc per la disposizione dell'adesivo, sempre tramite braccio robotico: vengono applicati quattro corsi di legante paralleli l'uno all'altro, a seconda dell'asse centrale dell'elemento. In questo modo è stato possibile anche ridurre l'impiego di materiale legante per realizzare i collegamenti tra gli elementi.
Questo progetto costituisce la prima importante applicazione sul costruito dello strumento del braccio robotico, integrato al processo progettuale e produttivo.

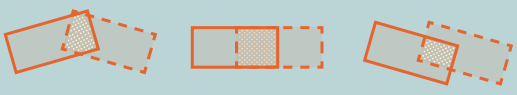




Dall'alto. Disposizione del mattone sull'elemento di facciata e preparazione delle pareti prefabbricate presso il laboratorio all'ETH di Zurigo.
La disposizione avviene dopo l'applicazione del legante, processo anche'esso robotizzato. Il braccio robotico prende il mattone e lo dispone sotto l'ugello per l'applicazione del legante in strisce parallele: l'ugello resta fermo ed è programmato solamente per emettere e bloccare il flusso di legante, mentre il braccio robotico si muove e si inclina al fine di realizzare depositare il legante lungo specifiche direzioni predeterminate.
Per l'impiego del legante sono stati condotti studi sulla modalità di deposizione che ha comportato anche a uno studio della quantità di legante da utilizzare: il metodo più efficace è risultato quelle con le strisce parallele, che risulta anche quello che dispone di meno di collegamento, la quale non coincide con la superficie di sovrapposizione; lo studio della sovrapposizione degli elementi e del comportamento meccanico ha permesso anche di individuare la dimensione massima e minima delle fughe tra i mattoni e di studiare quindi l'effetto luminoso interno. GKR



Legante su tutta la superficie dei due elementi sovrapposti
Superficie di collegamento 122 cmq



Legante disposto a punti su griglia regolare.
Superficie di collegamento 85 cmq



Legante disposto su 4 strisce parallele orientate parallele all'asse centrale dell'elemento.
Superficie di collegamento 64 cmq



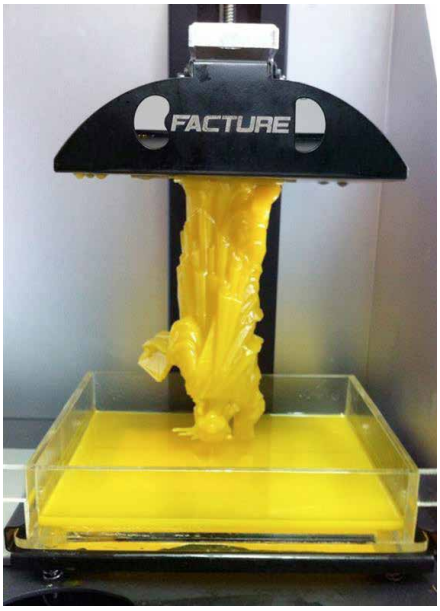
Inclinazione massima angolo 16,96°



Fuga minima 2 mm

Fuga massima 5,5 mm





09. Modelli di stampante 3D: FDM Fused Deposition Modeling di WASP, attraverso lo spostamento di un ugello viene depositato materiale che si asciuga gradualmente (crediti autore). DLP - Digital Light Processing, un proiettore che muove una luce su un polimero liquido contenuto in una vasca, dalla quale "estrae" l'oggetto solido stampato. CC0

il sistema di costruzione; il parco macchine oggi a disposizione è molto ampio ed è costituito principalmente da stampanti 3D, macchine CNC e bracci robotizzati in grado di compiere un numero pressoché infinito di operazioni su un altrettanto ampio numero di materiali. E, se ciascun materiale richiede il proprio strumento, il fattore comune tra tutte le lavorazioni può essere il supporto, il motore e forse il braccio robotico tramite il quale vengono utilizzati utensili diversi.

Ne deriva la necessità di distinguere gli strumenti e quindi di riconoscere le peculiarità di robot, stampanti 3D e macchine CNC. I gradi di libertà definiscono il lavoro del braccio robotico che può essere installato su una base fissa o mobile (grazie all'impiego di ruote o di binari) e che può muoversi con più gradi di libertà e operare su più assi contemporaneamente, lavorando in uno spazio georeferenziato. Grazie a una serie di movimenti flessibili i robot possono operare insieme ad altre macchine o essere affiancati a persone; essi ampliano la gamma di operazioni che possono essere compiute dalle macchine fisse quali le stampanti 3D e le macchine CNC, che effettuano operazioni su un piano definito. Rispettivamente, i processi di manifattura a cui vengono associati le stampanti 3D e le macchine CNC sono di tipo additivo e sottrattivo: nel primo caso si fa largo uso di materiali plastici, spesso polimeri, ma anche argilla o calcestruzzo, mentre nel secondo caso si utilizzano materiali solidi, sia naturali che artificiali. Il braccio robotico in funzione dell'utensile che dispone, può eseguire entrambe le tipologie di lavorazione, quindi depositare materiale tramite un ugello oppure forare un pannello per mezzo di una fresa.

La **stampa 3D** rappresenta oggi la tecnologia più utilizzata per la prototipazione impiegata nel campo del design e per lo sviluppo di prodotti per l'edilizia (fig. 09). Brevettata nel 1986 dall'ingegnere americano Charles W. Hull che la battezzò con il nome "stereolitografia", è oggi una tecnologia accessibile grazie ad un mercato che offre macchinari differenti per caratteristiche, dimensioni e prezzi e grazie alla rete che rende disponibili le informazioni e gli strumenti per costruire macchine a livello artigianale, sfruttando il supporto di numerose piattaforme accessibili online, la disponibilità di software e sistemi Arduino con cui eseguire le operazioni di programmazione e di comando della macchina.

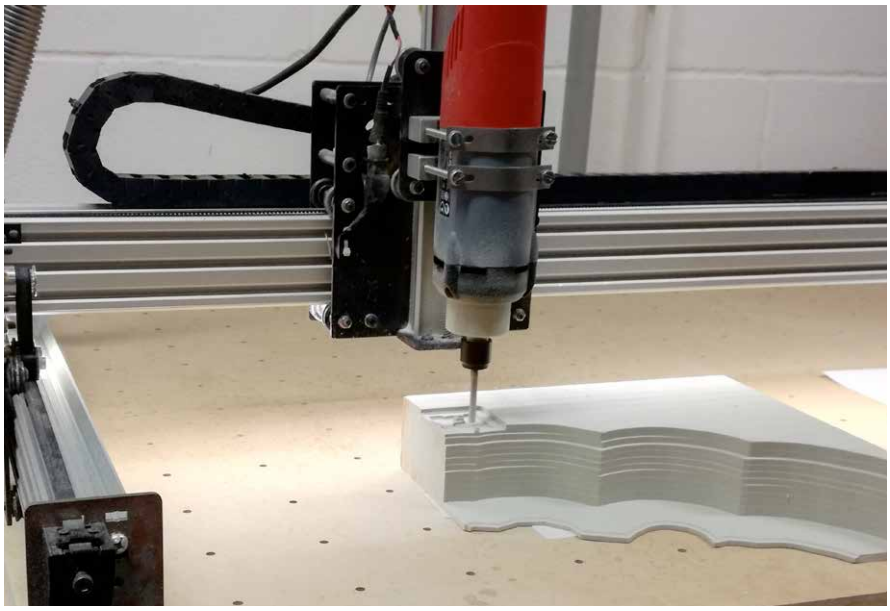
Con il nome di stereolitografia si fa riferimento all'impiego di processi elettronici e chimici su fotopolimeri per realizzare prodotti 3D senza l'impiego di elementi



10. BigDelta WASP è alta 12 m e stampa argilla mescolata con fibre naturali: per la realizzazione di Gaia è stata utilizzata una mescola composta per il 25% da terreno prelevato in sito (30% argilla, 40% limo e 30% sabbia), per il 40% da paglia di riso trinciata (RiceHouse), per il 25% da lolla di riso e il 10% da calce idraulica. BigDelta WASP è la stampante più alta al mondo, realizzata per costruire strutture impiegando risorse locali. WASP

di supporto. Nel corso degli anni questo processo è stato diversificato in funzione dello strumento di modellazione e del materiale impiegato: il *Digital Light Processing* (DLP) impiega un proiettore che muove una luce su un polimero liquido contenuto in una vasca; il *Selective Laser Sintering* (SLS) impiega un laser per sinterizzare un polimero granulare contenuto anch'esso in una vasca che man mano si abbassa; il *Fused Deposition Modeling* (FDM) impiega un ugello che deposita del materiale su di un piano stabile, strato su strato. Nei primi due processi (soprattutto nel caso del SLS) quasi mai è necessario stampare degli elementi di supporto per la realizzazione del prodotto finale, poiché la stampa avviene all'interno di una massa liquida o granulare. Il metodo FDM richiede l'impiego di supporti per garantire la stabilità della stampa[29] ma permette di utilizzare un numero più ampio di materiali, ciascuno dei quali richiede dei tempi di deposito differenti affinché la materia stampata non collassi[30]. La stampa FDM è il processo più diffuso, perché permette di ridurre al minimo il materiale di scarto e si adatta a processi sperimentali, sia di natura materiale che dimensionale: i processi SLS e DLP infatti necessitano di un contenitore per il polimero (liquido o granuloso) che determina la dimensione massima del prodotto finale. L'ugello del FDM può essere installato su bracci fissi o mobili e muoversi in ogni direzione, a seconda dei supporti su cui è installato: si possono quindi realizzare oggetti di piccola scala, come una piastrella in ceramica, e elementi di scala più grande, in calcestruzzo o in argilla, come nel caso delle stampanti WASP (fig. 10). Le stampanti FDM, a differenza di quelle che impiegano il laser, hanno inoltre dei costi accessibili e questo permette il loro impiego per progetti sperimentali.

La ricerca oggi si spinge non solamente verso la stampa di grandi elementi, come spesso i giornali e l'opinione pubblica raccontano, ma anche e soprattutto verso l'ottimizzazione della materia utilizzata. Nel caso della stampa FDM si stratta soprattutto di un controllo maggiore verso la riduzione dell'impiego di supporti, che vengono sempre comunque stampati, ma la stampa viene diversificata in materiale principale e secondario attraverso l'azionamento di due ugelli paralleli); allo stesso tempo si stanno sperimentando dei materiali la cui solidificazione è istantanea, al punto da non risentire quasi della forza di gravità[31], ma questo tipo di stampanti non appartiene al panorama di riferimento per il settore edile perché è necessario operare in un ambiente altamente controllato dato che le condizioni dell'intorno possono compromettere la corretta asciugatura del materiale depositato.



11. Esempio di manifattura sottrattiva: fresatura attraverso macchina CNC, con piano di lavoro fisso e mandrino mobile su cavalletto.

La **manifattura sottrattiva** lavora su molteplici materiali, sempre più numerosi grazie anche allo sviluppo delle scienze dei materiali. Con manifattura sottrattiva si intende un processo capace di modificare un elemento solido con una parziale asportazione di materiale, effettuata tramite un utensile adatto. La macchina a controllo numerico (*Computer Numerical Control*, CNC) è uno degli strumenti più diffusi a tal fine. Le CNC possono impiegare utensili differenti ed effettuare numerose tipologie di lavorazioni: gli utensili sono posizionati su di un albero della macchina che può muoversi lungo direzioni prestabilite. Il numero di assi consente una classificazione delle macchine CNC: quanti più sono gli assi su cui una macchina lavora, maggiori sono i gradi di libertà con cui potranno essere utilizzati gli strumenti installati (fig. 11). Generalmente gli assi sono tre (X, Y, Z) ma si possono contare anche decine di assi, ad esempio per eseguire operazioni su piani inclinati.

La tecnologia CNC si sviluppa a partire da un progetto che John T. Parsons ha avviato a partire dal 1940, in pochi decenni le CNC sono state adottate dalle grandi industrie (anni Cinquanta) e dalle piccole manifatture (anni Settanta), in particolare dalle falegnamerie e dalle carpenterie. È proprio in questi luoghi che la meccanizzazione dei processi industrializza operazioni fino ad allora svolte artigianalmente: le prime macchine CNC avevano un numero di gradi di libertà limitati ed eseguivano un numero ridotto di operazioni, le complessità della programmazione contribuivano all'affermazione di una produzione di tipo seriale. Dai primi impieghi ad oggi la gamma delle possibili lavorazioni si è molto ampliata grazie all'integrazione della tecnologia CNC con la tecnologia dell'informazione, e alla semplificazione della manovrabilità degli strumenti. Il tutto è gestito tramite l'interfaccia CAD/CAM, ovvero la collaborazione virtuale tra il sistema CAD (*Computer Aided Design*) e il sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Operazioni comuni come la foratura o la fresatura vengono rapidamente automatizzate, specialmente per la realizzazione di elementi nel settore dei mobili e dei serramenti. La macchina CNC nel corso degli anni si trasforma in un vero e proprio centro di lavoro corredato di un magazzino di utensili che può effettuare differenti lavorazioni con un'unica operazione automatica.

Il robot, inteso in questo contesto come braccio robotico, viene sviluppato ad uso delle linee industriali e ricopre le funzioni di un manipolatore atto a compiere

operazioni ripetitive. I primi robot vengono impiegati nell'industria automobilistica[32] e sono programmati per riprodurre i movimenti umani, tanto che le parti meccaniche prendono nome dalle parti del corpo umano (ad esempio: polso, gomito e spalla)[33]. Oggi i robot non si limitano ad imitare il gesto umano ma sfruttano precisione, velocità e forza per aumentare la produttività dell'industria.

Inoltre, le ricerche relative alle capacità meccaniche sono sempre più strettamente legate a quelle nel campo della sensoristica e rendono i robot più autonomi e, soprattutto, meno fallaci nella lavorazione e più sicuri. I sensori contribuiscono all'autonomia nella lavorazione poiché rendono i robot capaci di intervenire puntualmente sugli oggetti e i materiali, come risulta dalle ricerche dell'azienda IT-Robotics di Padova che ha sviluppato EyeT, un dispositivo che permette il riconoscimento di elementi in base alla morfologia e alla cromia (fig. 12). Dall'altro lato, i sensori relativi al tatto o al movimento permettono a un robot di arrestarsi o modificare la propria azione in presenza di persone o di fattori che mutano le condizioni dell'intorno rispetto allo standard, come avviene grazie alla robotica *Humanfacturing*[34] sviluppata da Comau.



12. EyeT sviluppato da IT-Robotics di Padova per il riconoscimento autonomo di elementi. IT-Robotics

2.5 Le trasformazioni della produzione

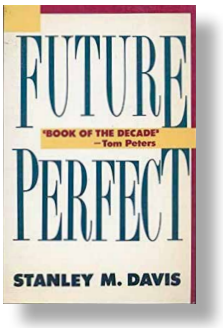
Associare l'idea di automazione alla mera sostituzione del lavoro umano con il lavoro della macchina è fuorviante e sposta l'attenzione dalle opportunità ai problemi: l'automazione porta con sé una vera e propria trasformazione logica, in cui l'intero processo di fabbricazione (intesa come produzione) viene ricostruito su una base completamente nuova (Lilley, 1957, p. 45). Dopo oltre settant'anni dalle prime teorizzazioni, questa base è formata da strumenti completamente diversi e soprattutto flessibili e capaci di comunicare tra loro, di svolgere più lavorazioni e quindi di ampliare le capacità operative dell'uomo, non solo in termini di forza ma anche di tipologia di lavorazione materiale (emblematici sono i casi della medicina e della chirurgia robotica).

I robot e le macchine a controllo numerico riescono a compiere le lavorazioni che oggi effettua solo l'uomo con l'ausilio delle macchine utensili. Gli strumenti dell'automazione velocizzano ogni processo e sono al servizio della flessibilità produttiva, al contrario delle macchine utensili che sono capaci di svolgere un numero limitato di lavorazioni; le macchine di più recente diffusione sono adatte ad impiegare più utensili e divengono così funzionali a eseguire differenti attività. Con linee di produzione sempre più rapide, l'industria riesce a rispondere in maniera puntuale e diversificata, creando prodotti specifici in funzione delle richieste del cliente: è ciò che Stanley M. Davis nel 1989 all'interno del suo libro *Future Perfect* definisce con il termine *mass customization* (fig. 13). Tutto ciò è ormai praticabile anche oltre i limiti definiti dalla letteratura e determina una serie di innovazioni che mettono in discussione il confine tra progettazione e produzione. Nel settore dell'architettura, le prime sperimentazioni ed applicazioni di ciò si hanno nel campo dei componenti per l'arredo e il rivestimento.

La produzione industriale associata al concetto di standardizzazione, e quindi ai grandi quantitativi di prodotti identici, si sta trasformando ed è orientata sempre più verso la customizzazione del prodotto. Tra i primi a fare della customizzazione una leva commerciale vi sono le case automobilistiche, alle quali i clienti possono richiedere *optional* o particolari finiture per la propria auto, come gli interni dell'abitacolo o vernici per la carrozzeria esterna. Dapprima, le varianti al modello base erano da scegliersi in riferimento ad una gamma di opzioni da combinare tra loro; oggi ogni cliente può proporre opzioni e varianti differenti da quelle predefinite dalla casa automobilistica e il grado di customizzazione può essere tanto elevato da consentire la realizzazione di prodotti quasi unici. Altri comparti produttivi, ad esempio quello dell'abbigliamento, stanno costruendo modelli di business basati sulla customizzazione del prodotto finale: chi produce calzature (Micelli, 2017) è passato dalla personalizzazione cromatica della scarpa, alla progettazione e allo sviluppo di suole create a misura dell'acquirente[35].

L'industrializzazione, pur mantenendo alti i numeri dei pezzi realizzati, diversifica la produzione: Giuseppe Ciribini (1984) definisce questa come "l'era delle super scelte" proprio perché la produzione industriale può rispondere in maniera puntuale alla richiesta del cliente, quasi come fosse una forma artigianale di produzione, strettamente legata al cliente.

Anche l'artigianato si trasforma e ciò avviene in tempi lunghi e anche grazie all'impiego di macchine, robot e software. Occorre immaginare che per alcuni settori produttivi, come quello edilizio, l'opera artigianale (intesa come la capacità di rispondere puntualmente a un bisogno), debba essere riprodotta a scala industriale, proprio come sosteneva la scuola del Bauhaus, fin dalla sua fondazio-



13. Future Perfect di Stanley M. Davis, pubblicato nel 1989 da Addison-Wesley Publishing, Boston. Davis ha introdotto il concetto di mass customization per indicare il futuro cambiamento della produzione in relazione alla trasformazione degli strumenti, allontanandosi dalla produzione di massa standardizzata.

ne a Dessau nel 1919, sotto la direzione dell'architetto Walter Gropius[36]. Questo pensiero, sebbene all'epoca del Bauhaus venisse sviluppato in stretto riferimento all'associazione industria - produzione seriale[37], risalta grandemente la continuità che l'artigianato possiede nel rapporto con l'industria. Nell'opuscoletto pubblicitario *Bauhaus Dessau* stampato nel 1927 si legge: "[…] il Bauhaus formerà un nuovo tipo, finora inesistente, di collaboratori per l'industria e l'artigianato; questi uomini padroneggeranno in ugual misura gli aspetti tecnici e quelli formali della produzione […] Il Bauhaus sostiene l'opinione che il contrasto tra l'industria e l'artigianato sia caratterizzato non tanto dalla differenza degli strumenti usati, quanto dal fatto che l'industria applica la divisione del lavoro mentre l'artigianato conserva al lavoro il suo carattere unitario. Artigianato e industria si stanno però costantemente avvicinando. L'artigianato del passato ha subito profonde trasformazioni; l'artigianato del futuro sarà assorbito in una nuova unità del lavoro produttivo in cui sarà affidato il lavoro di ricerca e di sperimentazione che precederà la produzione industriale" (Wingler, 1987, p. 190). Walter Gropius evidenzia come la differenza tra artigianato e industria sia soprattutto metodologica e non solamente riferita agli strumenti della produzione, che oggi attraverso la digitalizzazione e la robotica sono più vicini e contribuiscono a ridefinire il concetto stesso di produzione industriale. La produzione industriale infatti, proprio attraverso l'automazione, non comporta necessariamente una ripetizione del gesto produttivo, quindi la medesima trasformazione, ma la possibilità di applicare mutevolmente la capacità propria dell'artigianato, quella di rispondere puntualmente a un bisogno. Il confine tra settore artigianale e industriale si riduce in quanto divengono molto simili le competenze produttive attraverso l'introduzione di nuovi strumenti digitali: una somiglianza che non si riferisce solamente alla capacità di modellare un prodotto ma riguarda una cultura materiale più ampia, proprio per poter rispondere puntualmente alle esigenze di un cliente.

2.6 La manifattura ibrida

La connotazione del concetto di automazione cambia anche in funzione delle macchine impiegate: storicamente l'automazione era legata alla produzione di grandi quantitativi di pezzi tutti uguali, la cui vendita rappresentava un metodo per ammortizzare le spese per l'acquisto dei macchinari; ora l'automazione è svincolata dall'omogeneità dei prodotti e dal numero dei pezzi realizzati: le macchine sono flessibili e il loro costo può essere ammortizzato con un minor numero di prodotti, diversi tra loro e più rispondenti alle richieste di una specifica committenza. Il passaggio descritto si rivolge a un mercato alla ricerca di prodotti unici, come aveva già anticipato Stanley M. Davis nell'introdurre il concetto di *mass customization* con *Future perfect* (1989) e nel descrivere un pubblico che è disposto a investire di più per ottenere ciò che desidera.

Le prospettive di evoluzione descritte sono oggi supportate da piani di finanziamento statali ed europei per l'acquisto di macchine, software e strumenti volti a implementare l'attività dell'azienda, snellire i processi e promuovere attività di formazione del personale in azienda. Il miglioramento non va inteso in termini di quantità, bensì di qualità, e cioè nella capacità di rispondere direttamente alle richieste dei clienti: il valore aggiunto del prodotto finale corrisponde alla possibilità di personalizzare, e accompagnare un cliente nella scelta finale può divenire un fattore determinante nello sviluppo di un'azienda (Butera, 2018).

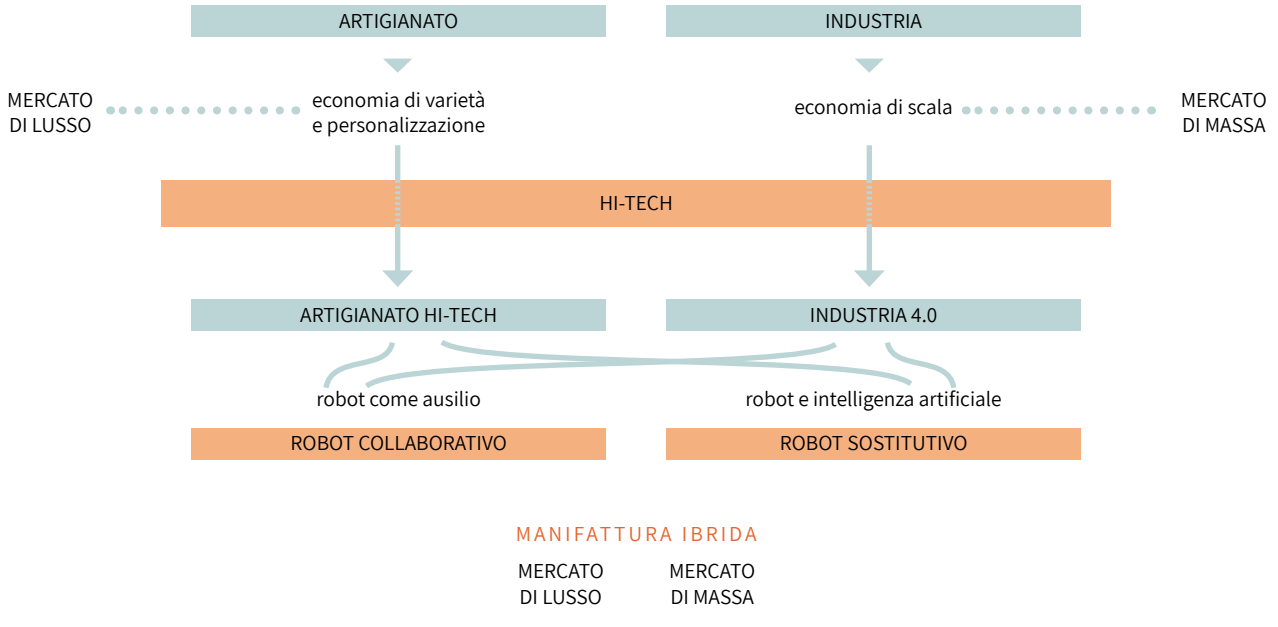
La robotica, che rappresenta la massima espressione meccanica dell'automazione, costituisce lo strumento principe per costruire una produzione di qualità più che di quantità, ricercando forme e materiali appropriati all'obiettivo finale da raggiungere, valorizzando il progetto attraverso la ricerca e lo sviluppo degli stessi strumenti da lavoro. Questo tipo di produzione rimanda fortemente alle caratteristiche del lavoro artigianale, contraddistinto da un lavoro prettamente manuale e volto alla produzione o alla riparazione di oggetti. Oggi invece le lavorazioni artigianali non sono più solo quelle eseguite esclusivamente a mano e la figura dell'artigianato non è più caratterizzata esclusivamente dai gesti della lavorazione ma è riconosciuta come una figura capace di "dominare il dialogo fra azione e riflessività" (Micelli, 2011, p. 25).

Questa riflessione mostra come i confini tra i due sistemi produttivi non siano oggi più così ben definiti: gli eterni duellanti, artigianato e industria, possono trovare strade comuni esaltando le reciproche peculiarità e superando un'opposizione che è più ideologica che reale (Micelli, 2011, p. 129). Questa nuova forma manifatturiera è oggi identificata attraverso l'impiego di differenti nomi spesso di origine anglosassone (*Smart manufacturing, Post-industrial manufacturing*, …) o relazionati ai programmi di sviluppo (in Italia ad esempio *Industria 4.0*): una terminologia non ancora chiara e definitiva per una forma di manifattura in via di affermazione. Rispondendo all'esigenza di definizione, si potrebbe considerare "ibrida" la manifattura capace di utilizzare le competenze artigianali su larga scala e di replicarle ove necessario.

L'impiego dell'automazione può quindi rendere ibrida la manifattura e, allo stesso tempo, la può caratterizzare in maniera molto netta, in funzione della modalità in cui viene impiegata. I robot collaborativi definiscono processi in cui le persone sono presenti e attive nella filiera produttiva, il robot affianca l'uomo in alcune tipologie di lavorazione ad esempio per rendere più sicure mansioni come lo spostamento di elementi pesanti. In altri casi i robot possono operare in sostituzione dell'uomo, la cui presenza fisica non è più necessaria perché è sufficiente un controllo remoto della produzione robotizzata (fig. 14).

Associare i robot di tipo collaborativo alle produzioni medio-piccole e i robot di tipo sostitutivo alle grandi industrie è riduttivo, poiché sono varie le forme di collaborazione uomo-macchina e, soprattutto, esse sono differenti in

14. L'Hi-Tech, l'alta tecnologia, rappresenta la tecnologia più avanzata disponibile e quindi è un settore in continua trasformazione e in continuo aggiornamento. Questa tecnologia oggi, attraverso la digitalizzazione e l'automazione, contribuisce a trasformare e ad avvicinare settori storicamente considerati lontani, l'artigianato e l'industria.



funzione delle specifiche lavorazioni da eseguire. Sebbene la robotica occupi spesso una parte della lavorazione industriale o artigianale, esistono casi in cui l'automazione definisce l'intero processo produttivo al punto tale che la presenza dell'uomo non è necessaria, di conseguenza interi edifici possono essere progettati a misura di macchina, senza considerare la presenza dell'uomo: questa tipologia di fabbrica viene definita "a luci spente"[38], poiché l'illuminazione, indispensabile per permettere all'essere umano di lavorare, risulta superflua nel caso delle macchine.

Le finalità della robotica e dell'automazione nelle linee di produzione, devono essere definite puntualmente in relazione all'impiego che ne fanno le imprese (grandi o piccole che siano). È certo che l'impiego dell'automazione si ripercuoterà sul valore del prodotto finale, che non sarà più esclusivamente legato alla lavorazione manuale e sarà influenzato soprattutto dal materiale utilizzato e dal concetto ideativo. L'automazione, inoltre, potrà rendere più accessibili alcune lavorazioni attualmente considerate complesse e onerose: esse saranno disponibili per un mercato più ampio e consentiranno di superare quel sistema di soluzioni che, nel settore edilizio, vengono definite "a pacchetto" (Sinopoli, 1997)[39].

Sebbene le prospettive possano essere positive, l'automazione fa ancora paura: lo stato comune, definito anche come pregiudizio (Gramazio e Kohler, 2014, p. 114), solleva dubbi sull'impiego dei robot in architettura perché fa temere lo stravolgimento del processo architettonico, più meccanizzato e meno incentrato sul fattore umano. Come negli altri ambiti, l'ibridazione di un lavoro con elementi di informatizzazione deriva dalle modalità con cui l'automazione e, in questo caso specifico, la robotica vengono utilizzate. In questo ambito, la ricerca scientifica svolge un ruolo cruciale: è in grado di immaginare prospettive future senza percepire come stringente il vincolo del mercato, a cui ogni azienda è ovviamente legata. L'automazione e la digitalizzazione possono cominciare a ridurre la distanza tra ambiti spesso considerati lontani, quali la ricerca e la produzione, l'artigianato e l'industria.

L'impiego della robotica in architettura amplia l'ambito di competenza del progettista e offre nuove opportunità nell'ambito della modellazione dei singoli elementi e del loro assemblaggio, anche consentendo di riscoprire e reinterpretare le conformazioni strutturali tradizionali. La materia non è più solamente legata alle leggi fisiche, ma è potenziata dalle informazioni digitali: Gramazio e Kohler definiscono con *Digital Materiality* proprio questa trasformazione, in cui la materia è "arricchita dalle leggi del mondo immateriale della logica digitale" (Gramazio e Kohler, 2008, p. 8). La fabbricazione robotica costituisce lo strumento principale attraverso il quale sfruttare le potenzialità concesse dall'innovazione digitale, uno strumento grazie al quale la digitalizzazione dell'architettura non rimane astratta ma acquisisce un valore fisico e concreto (Gramazio e Kohler, 2014, p. 17) perché l'uomo attraverso essa può interagire con la materia in modo innovativo. L'impiego degli strumenti e la sperimentazione progettuale, attraverso la robotica, riescono ad ampliare le capacità di impiego della materia e ad aumentare il suo potenziale intrinseco; al contempo, i progettisti possono (e devono) rivalutare lo studio dei materiali e delle loro lavorazioni attraverso un rinnovato spirito artigianale, troppo spesso dimenticato nei decenni dell'industrializzazione e della produzione di massa e oggi riscoperto grazie alla digitalizzazione. Riscoprire la cultura materiale[40] e il "patrimonio di idee, di tecniche e di costumi che si trasmettono quale espressione collettiva" (Nardi, 1992, p. 98) consente di definire un progetto e una cultura propri di una società e, nel

INDUSTRIA 4.0

Nel settembre 2016 è stato presentato il Piano Industria 4.0, conosciuto anche come Piano Calenda (da Mario Calenda, allora Ministro dell'Economia durante il Governo Renzi). Il Piano si allineava ad alcune direttive già in atto in altri Paesi europei, come Francia e Germania, che prevedeva finanziamenti per l'aggiornamento tecnologico del settore produttivo. Ogni anno il Piano viene modificato e approvato con la Legge di Bilancio, al fine di definire la quantità di denaro da investire e sua destinazione.
Obiettivo del Piano è quello di aggiornare il comparto produttivo, sempre più estesa e varia: tale aggiornamento non si limita tuttavia nell'acquisto di macchinari e strumenti di ultima generazione, ma anche nella formazione del personale e negli incentivi per supportare l'avvio di nuove attività e nuovi progetti. Si tratta di agevolazioni economiche di diversa misura a seconda del settore di investimento.
Le agevolazioni per le imprese sono:

- Super ammortamento beni materiali strumentali;
- Iper ammortamento beni materiali strumentali;
- Nuova Sabatini;
- Costi di Ricerca & Sviluppo;
- Patent box;
- Start up e Pmi Innovative;
- Fondi di garanzia;
- Aiuto alla crescita economica;
- Diminuzione Ires;
- Imposta sul reddito delle imprese (Iri)
- Contabilità per cassa;
- Salario di produttività;
- Credito d'imposta per formazione 4.0.

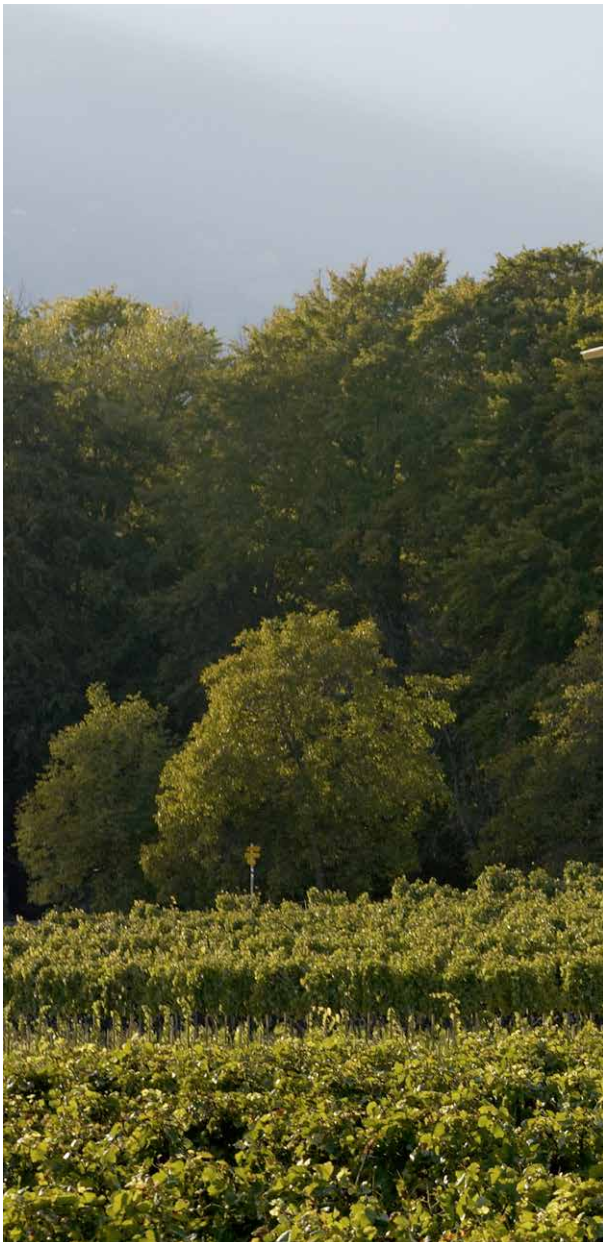
L'iper ammortamento riguarda in particolar modo l'automazione e l'interconnessione di processi industriali. Il piano prevede in questo caso una serie di strumenti utili all'aggiornamento tecnologico: macchine utensili per l'asportazione e l'aggiunta di materiale; macchine per l'assemblaggio; robot, robot collaborativi e sistemi multi-robot; macchine per la manifattura additiva; macchine per la movimentazione di pezzi; magazzini automatizzati interconnessi a sistemi gestionali di fabbrica.
Accanto ai finanziamenti per l'acquisto e l'aggiornamento strumentale, sono stati disposti anche finanziamenti per la formazione del personale, quindi corsi più o meno specializzati sulle nuove tecnologiche e il loro impiego all'interno dell'azienda.

caso più specifico, di un mestiere. La cultura materiale incorpora anche la "tacita conoscenza"[41] (Sennet, 2008), cioè quel sapere frutto dell'esperienza tramandata, basata su tecniche e attenzioni che si sono consolidate nel corso della storia, non necessariamente pubblicate su manuali o riscontrate con sperimentazioni scientifiche: la "tacita conoscenza" caratterizza il lavoro artigianale. L'impiego della robotica e della digitalizzazione può riportare il processo della produzione a una forma artigianale nella misura in cui riconduce alla visione e all'ideazione della materia propria di un artigiano[42], ma potenziata di nuovi strumenti con cui sperimentare le proprietà dei materiali. La robotica costituisce dunque uno strumento attraverso cui la cultura materiale può trovare rinnovato vigore all'interno del processo architettonico; la cultura materiale infatti, alla base dello sviluppo dell'architettura diffusa[43], ovvero "quell'architettura propria della collettività e della ripetizione, quella in cui il progetto procede secondo i tempi lunghi e relativamente inconsci della tradizione" (Nardi, 1992, p. 99), ha subito un declino corrispondente allo sviluppo dell'industrializzazione passata, che ha alienato il progetto dalla tradizione costruttiva e quindi anche dalle tecniche e conoscenze materiali.

2.7 Il progetto della flessibilità standardizzata

Quanto e come l'automazione possa contribuire al progetto architettonico, è una questione ancora aperta e in fase di sperimentazione, soprattutto nei campi della lavorazione materiale per la produzione di componenti e del loro assemblaggio, sia in fabbrica che in cantiere. Nel 2005 nasce a Zurigo il primo laboratorio universitario di ricerca dedicato all'impiego della robotica in architettura, su un'idea dei professori Fabio Gramazio e Matthias Kohler, con l'obiettivo di attribuire al robot un valore diverso da quello a cui era solitamente associato, ovvero una macchina industriale (Gramazio e Kohler, 2014, p. 104): la norma ISO 8373-2.3 (1994) definisce il robot industriale come "un manipolatore con più gradi di libertà, governato automaticamente, riprogrammabile, multiscopo, che può essere fisso sul posto o mobile per utilizzo in applicazioni di automazioni industriali". Il robot per l'architettura è invece uno strumento attraverso il quale sperimentare nuove modalità di lavorazione materiale e di assemblaggio di componenti, uno strumento che può adattarsi ai diversi contesti d'impiego e, soprattutto, che slega le esigenze del progetto dai vincoli storicamente caratterizzanti la produzione industriale. Il robot può offrire nel concreto ciò che siamo in grado di sviluppare con i sistemi digitali affermando "la diretta connessione tra dati progettuali e procedure operative di costruzione [che] inducono a nuovi processi progettuali basati su strategie di fabbricazione" (Gramazio e Kohler, 2014, p. 16).

La facciata dell'azienda vinicola Gantenbein a Fläsch in Svizzera (Bearth&Deplazes Architekten, Gramazio e Kohler, 2006) rappresenta il primo progetto in cui il robot è stato parte integrante del processo architettonico, indispensabile per la costruzione delle chiusure verticali dell'edificio, realizzate in mattoni e sostenute da un telaio in cemento armato. Le facciate riproducono in forma tridimensionale degli acini d'uva (fig. 15): la digitalizzazione del disegno ha permesso di sviluppare gli algoritmi matematici utili alla costruzione di queste forme. La giustapposizione tra i piccoli elementi e la progettazione dei giunti e delle distanze tra essi, definisce una parete capace di filtrare luce e aria per



15. La cantina Gantenbein Vineyard, a Fläsch (Svizzera), realizzata nel 2006 dallo studio Bearth & Deplazes Architekten, in collaborazione con il gruppo di ricerca Gramazio Kohler dell'ETH di Zurigo. La realizzazione di questa facciata costituisce uno dei primi progetti ad utilizzare la tecnologia robotica nel processo progettuale. Ralph Feiner



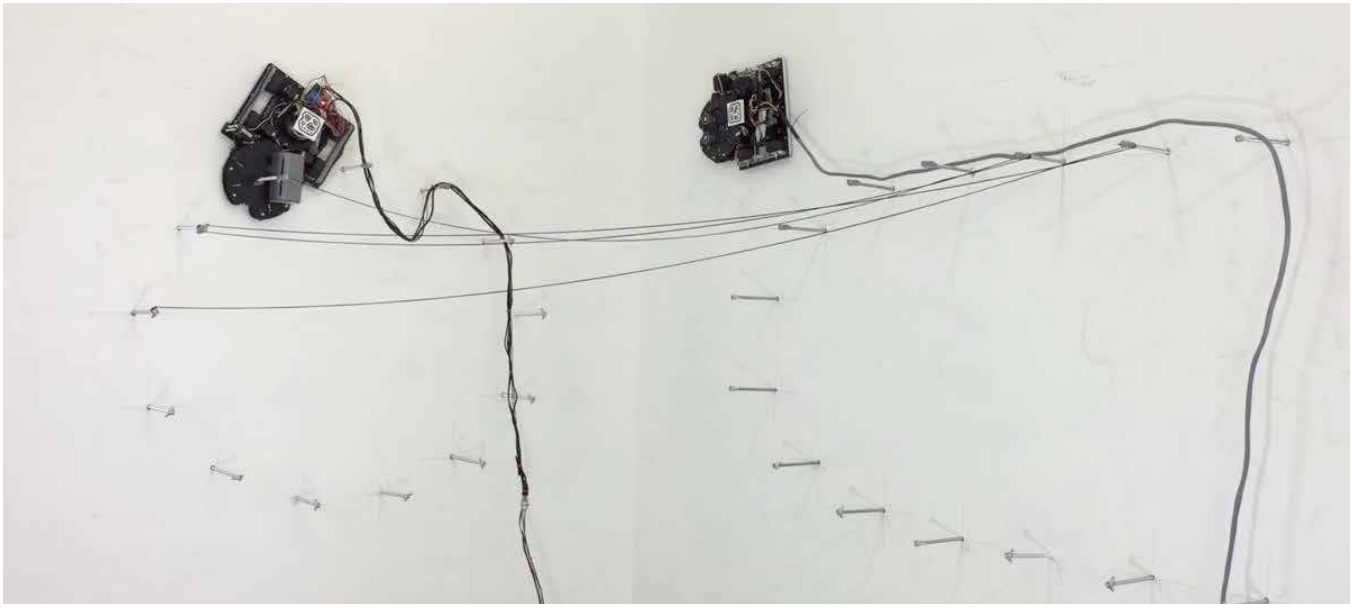
l'ambiente interno. Gli algoritmi matematici descrivono la corretta disposizione dei mattoni e l'assemblaggio con un agente adesivo. Per la realizzazione della facciata sono stati utilizzati oltre 20 mila mattoni con i quali sono stati realizzati in officina 72 elementi di facciata che sono stati successivamente posti in opera in cantiere. La complessità del disegno d'insieme non ha solo trovato nel robot la giusta soluzione per la messa in opera, me è proprio in virtù dell'impiego di strumentazioni avanzate che ha trovato il fondamento del suo sviluppo progettuale.

L'impiego del robot al fine di disporre le parti di cui è composta un'architettura diviene la chiave di molte ricerche di Gramazio e Kohler presso l'ETH di Zurigo. Sfruttando i robot come strumenti movimentati dai software e sulla base di algoritmi matematici, Gramazio e Kohler elaborano schemi strutturali tanto complessi da poter essere correttamente realizzati solo da una macchina. Software e macchine ampliano quindi le possibilità di sviluppo formale degli elementi strutturali e, al contempo, riducono drasticamente il margine d'errore, il tempo, le risorse e l'energia che altrimenti si renderebbero necessari per la realizzazione di architetture così complesse dal punto di vista formale e tecnologico. Grazie ai robot e all'automazione è possibile trovare nuove disposizioni per la messa in opera di elementi standard, come il mattone, impiegare materiali e prodotti in modo differente, come nel caso delle macerie da demolizione, ed utilizzare i materiali tradizionali in forme nuove, come avviene con il legno: la ricerca definisce una nuova fisica costruttiva che, grazie all'automazione, consente di scoprire nuove potenzialità nei materiali, in relazione alla loro progettazione e definizione morfologica, alla possibilità di assemblaggio e di connessione.

La connessione digitale tra software per l'elaborazione delle strutture (CAD) e software per programmare la lavorazione (CAM), permette ai robot di rispondere simultaneamente a variazioni in corso d'opera e di adattarsi alle modifiche costruttive, come nel caso della facciata di Gantenbein: ogni minimo spostamento, anche solo di un solo mattone, consente di constatare che "un infinito numero di relazioni nella logica complementare tra geometria e tettonica, tra l'elemento individuale e l'intera struttura, sono cambiate" (Gramazio e Kohler, 2014, p. 185).

Adottare tale sistema di lavoro comporta lo sviluppo di una *prefabbricazione puntuale*, attraverso la quale ogni elemento e collegamento è progettato e determinato in fase di progetto e attraverso la quale viene superata quella flessibilità nella disposizione degli elementi che era stata promossa dall'industrializzazione e dal *componenting*. Tale prefabbricazione puntuale può interessare ogni parte dell'edificio: i pannelli di rivestimento, gli elementi di connessione e anche i componenti più complessi, come quelli strutturali.

Per eseguire le operazioni di modellazione e assemblaggio si possono utilizzare **robot a base fissa**[44] o **su base mobile a terra**[45], come nel centro ICD - Institute for Computational Design and construction di Stoccarda, o a cielo, come nel laboratorio RFL - Robotic Fabrication Laboratory di recente costruzione a Zurigo. Questi sistemi permettono di impiegare macchinari pesanti e di grandi dimensioni, ampliando il raggio d'azione del braccio robotico. Inoltre, l'installazione a cielo permette di liberare lo spazio a terra, di disporre di più superficie per la produzione di componenti e di ridurre il rischio di incidente tra uomo e robot perché operanti su livelli differenti. Questi sistemi possono essere impiegati per la realizzazione di telai diffusi, tipo *platform frame*[46], disponendo

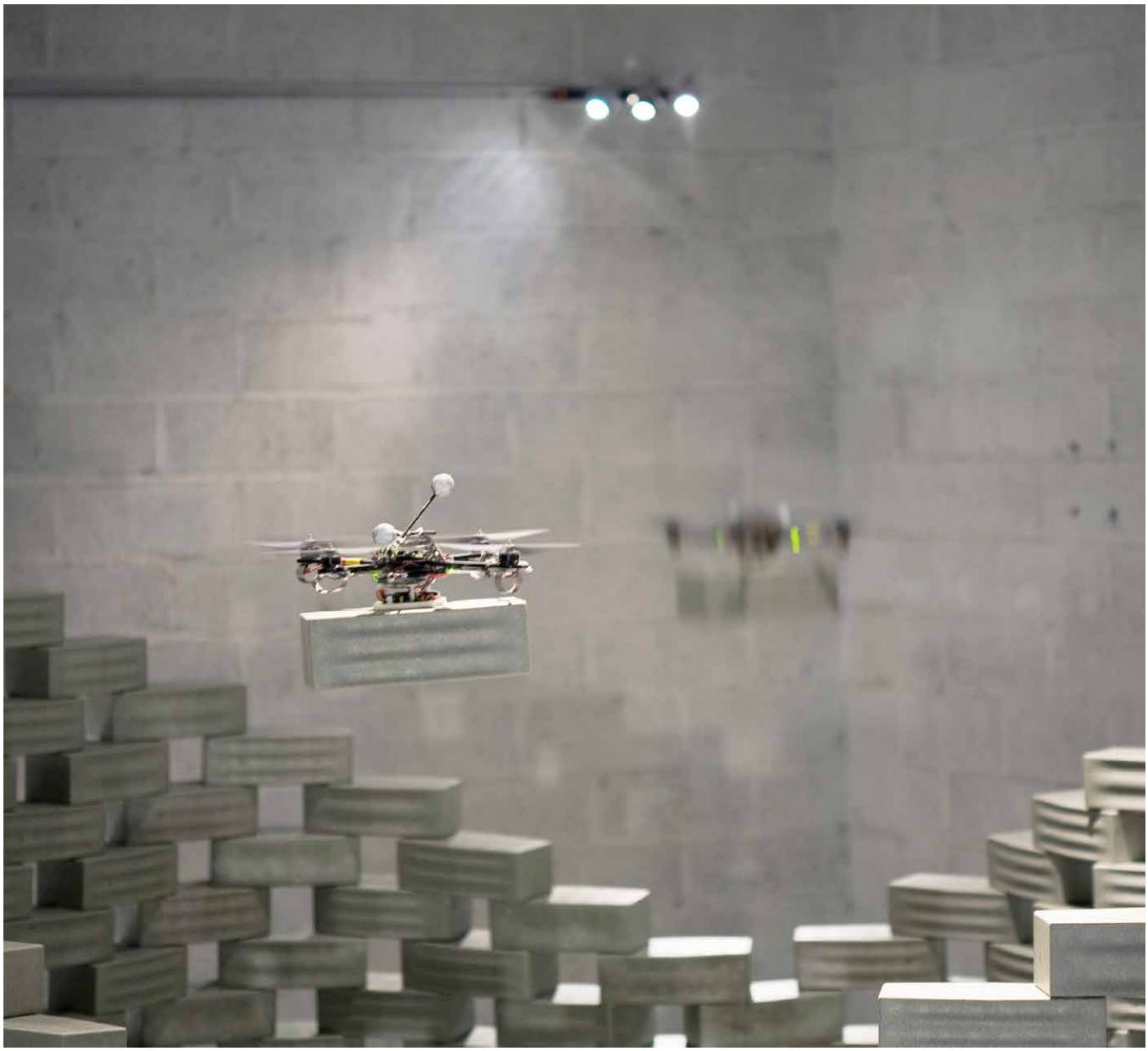


16. Mobile Robotic Fabrication System for Filament Structures è un progetto di Maria Yablonina (2015, ICD Stoccarda), che sfrutta dei robot da parete chiamati wall climbing robots, capaci di coordinarsi e in questo caso di scambiarsi un filamento per realizzare una struttura appesa alle pareti. ICD

profili in metallo o listelli in legno in maniera puntuale[47] all'interno del sistema complessivo e in alcuni casi anche eseguendo le forature dei collegamenti, come in *Gradual Assemblies - Gramazio Kohler Research* (2018), il padiglione estivo installato presso l'Istituto Svizzero a Roma, in cui la progettazione e produzione delle aste e il montaggio dei telai parziali sono stati eseguiti interamente presso il Robotic Fabrication Laboratory presso ETH Zurigo.

Lo sviluppo della sensoristica sta migliorando la capacità dei software di leggere le caratteristiche dei materiali su cui le macchine operano[48] e dell'ambiente in cui lavorano. I bracci robotici, installati su ruote o cingoli, sono in genere operativi in uno specifico ambito: possono essere bracci con ugelli per la deposizione di materiale plastico (come calcestruzzo o argilla fibrorinforzati) o con elementi utili alla messa in opera a secco di materiali granulari aggregati, come avviene nel progetto di ricerca *Jammed architectural strucutures* (2015-2019, ETH Zurich Research Grant project), che sfrutta le proprietà della ghiaia nel mantenersi compatta per intervenire su una scala sempre più piccola al fine di progettare e realizzare componenti nel dettaglio. La sperimentazione sulla mobilità dei robot ha sviluppato i *wall climbing robots*, cioè robot capaci di muoversi su superfici verticali senza l'ausilio di carrucole automatiche poste in sommità[49], al fine di compiere operazioni di monitoraggio o di assemblaggio di elementi, ne è un esempio il progetto *Mobile Robotic Fabrication System for Filament Structures* di Maria Yablonina (2015, ICD, Stoccarda), in cui due *wall climbing robots* operativi su due pareti ad angolo, interagiscono tra loro e tessono un filamento fibrorinforzato tra i tasselli inseriti sulle pareti (fig. 16). Questa categoria di robot espande lo spazio d'intervento rispetto a un robot industriale su base fissa o mobile e, attraverso l'implementazione della sensoristica, amplierà l'autonomia della macchina nella relazione con superfici o spazi differenti (Yablonina et al, 2017).

Di recente sperimentazione è l'impiego di **droni** per l'assemblaggio di elementi finiti e standardizzati: sebbene il grado di precisione e di controllo non sia ancora paragonabile a quello di un braccio robotico, le prospettive di impiego dei droni sono varie, in particolar modo per le attività *in situ* legate allo spostamento di materiali. Il progetto di ricerca *Flight Assembled Architecture* (2012, Raffaello D'Andrea, Fabio Gramazio e Matthias Kohler) impiega droni



17. Flight Assembled Architecture è un progetto di assemblaggio di elementi attraverso l'impiego di droni, capaci di muoversi in uno spazio georeferenziato, di trasportare elementi di identiche dimensioni e di posizionarli secondo un progetto specifico. Il progetto è stato realizzato da Raffaello D'Andrea, Fabio Gramazio e Matthias Kohler (2012). François Lauginie

per depositare mattoni in specifiche posizioni, grazie ad un sistema di georeferenziazione dell'ambiente (fig. 17): i droni impiegano una ventosa per agganciare ogni elemento che è stato precedentemente e adeguatamente predisposto su di un piano di atterraggio, successivamente, i droni trasportano questi "mattoni" fino alla posizione indicata dal progetto, sempre utilizzando i punti dello spazio come riferimento per il volo e l'operazione di messa in opera. L'assemblaggio di parti, che in questo caso riguarda componenti semplici, viene oggi studiato e sviluppato con le prospettiva di riuscire ad affrontare sfide più complesse: ARUP presentò nel 2013 il progetto *It's alive!*, ambientato nel prossimo 2050, e descrisse bracci robotici volanti capaci di trasportare intere unità abitative, e impiegati per assemblare parti di un palazzo o eseguirne la manutenzione attraverso la sostituzione di unità (Arup, 2013).

Attualmente i droni non sono ancora impiegati per il trasporto materiali e per attività di montaggio in cantiere, ma in Giappone, il Paese più avanzato nell'impiego dell'automazione in cantiere, si utilizzano robot STCR capaci di muoversi autonomamente per compiere specifiche operazioni, come attivi-

tà di controllo, trasporto materiali pesanti o operazioni in punti pericolosi da raggiungere. Si tratta di robot che, attraverso un raffinato insieme di sensori, leggono e immagazzinano dati in merito al contesto e alle sue variazioni frutto del normale evolversi del cantiere; ciò consente al robot di adeguare gli spostamenti, di svolgere le operazioni assegnate in funzione delle variazioni di cui essi stessi concorrono allo sviluppo.

Queste caratteristiche migliorano le prestazioni anche dei robot impiegati per l'assemblaggio di elementi più piccoli all'interno delle officine, come nel caso della produzione di pannelli prefabbricati stratificati per la realizzazione dei quali le macchine sono fondamentali per controllare la giustapposizione dei materiali.

La libertà di movimento di un robot è perciò limitata dai gradi dei vincoli della propria struttura meccanica e dalla tipologia di collegamento che essa ha o meno su un piano: tali condizioni determinano la progettazione architettonica del montaggio, che ora con questi strumenti pare addirittura svincolarsi dalla forza di gravità e riuscire a governare lo spazio nella sua (quasi) totale interezza, senza la necessità di disporre di strutture ausiliari o l'inserimento di elementi di riferimento. Si pensi ad esempio al picchettamento per la disposizione delle fondazioni: sebbene lo spazio sia georeferenziato, la costruzione necessita di segnali fisici per essere riconoscibile all'occhio umano, laddove un robot riconosce e rielabora le indicazioni digitali operando in cantiere con un grado di precisione molto simile a quello concesso dall'ambiente protetto dell'officina.

Nella realizzazione degli elementi che compongono il progetto, la massima espressione della digitalizzazione si ha nello sviluppo della relazione tra l'attività progettuale e l'attività produttiva degli elementi strutturali, che sono tra i più complessi da porre in opera e da progettare. Lo sviluppo dei componenti strutturali in virtù dell'automazione non si limita alla definizione formale e fattiva di sperimentazioni morfologiche, lo studio affronta anche la disposizione tra le parti, le tipologie dei collegamenti, e le fasi del montaggio, e quindi partecipa allo sviluppo del linguaggio costruttivo e architettonico che la robotica sta contribuendo a riscrivere: "[…] attraverso il robot, il digitale rivela la sua nascosta natura costruttiva e così porta a una vitale continuazione della tradizione costruttiva in architettura nell'era dell'informazione" (Gramazio e Kohler, 2008, p. 101). Mentre la macchina utensile e il processo di meccanizzazione hanno contribuito ad allontanare la produzione industriale da quella artigianale, ora l'automazione, attraverso la robotica, può riavvicinarli.

La flessibilità degli strumenti di lavoro contemporanei "destandardizza" (Ciribini, 1984) la produzione e i componenti strutturali vengono così realizzati per specifici impieghi e non più intercambiabili. Muta così la "cultura dei prodotti assemblati nelle relazioni" (Nardi, 1992)[50] ovvero la ricerca e la progettazione del giunto: dal giunto multiforme e adattabile, utile a collocare elementi costruttivi con quanta più flessibilità possibile all'interno di un sistema, si passa al giunto puntuale realizzato esclusivamente per uno specifico impiego. L'automazione permette di abbandonare gradualmente la tanto ricercata *flessibilità industrializzata*, ovvero quella progettazione che mirava a utilizzare elementi standardizzati e componibili tra di loro caratterizzati da un alto grado di intercambiabilità, per sviluppare nuova forma di industrializzazione che è più flessibile quanto più vario è lo sviluppo progettuale. Parallelamente all'evoluzione delle tecnologie[51] vi è la sperimentazione di ruoli più complessi per i robot, ai quali non vengono più affidate solo le lavorazioni inerenti ai trattamenti superficiali, ma anche operazioni complesse quali la produzione di

componenti strutturali dal ridotto grado di intercambiabilità: "[…] in termini tecnologici il prodotto post-industriale tende a personalizzarsi in funzione dell'uso e non già in virtù di valorizzazioni differenziali destrutturate e inessenziali" (Ciribini, 1984).

La robotica impiegata nelle linee di produzione può contribuire a configurare una nuova forma di prefabbricazione o, per lo meno, può contribuire a superare la sua connotazione attuale, assimilata all'idea di standard e alla riduzione dei costi di messa in opera di un manufatto edilizio. È il carattere stesso di flessibilità ad essere standardizzato, non tanto nella configurazione dell'elemento, bensì in quella dello strumento, che è potenzialmente programmabile e adattabile alle necessità produttive[52]: si tratta di un graduale trasferimento di flessibilità, ovvero dai componenti edili flessibili e adattabili, agli strumenti di lavoro sempre più adattabili alle differenti necessità di lavorazione, per realizzare specifici prodotto.

La flessibilità degli strumenti diviene, nel corso del tempo, il campo di ricerca ideale per investigare la relazione tra materia e costruzione: nel 2001 viene fondato l'istituto IAAC - *Institute of Advanced Architecture in Catalonia* di Barcellona, che costituisce nel contesto europeo il primo istituto dedicato alla sperimentazione della manifattura digitale in architettura, additiva e sottrattiva[53]. Negli anni successivi si costituiscono nuove unità di ricerca: quella di Gramazio e Kohler formatasi nel 2005 presso l'ETH di Zurigo e l'ICD - Institute for Computational Design and Construction fondato nel 2008 (fig. 20), che rappresentano due tra i più importanti istituti di ricerca europei in questo ambito. Gradualmente è cresciuto anche l'impiego di bracci robotici per sperimentare attività di lavorazione e assemblaggio in campo edile andando a implementare anche unità di ricerca già esistenti e specializzate in differenti ambiti, come l'IBOIS presso l'EPFL di Losanna, nato nel 2008 per la ricerca e la sperimentazione nel settore delle costruzioni in legno. Tale crescita è testimoniata anche dall'associazione internazionale *Robots in Architecture*, fondata nel 2010 da Sigrid Brell-Cokcan e Johannes Braumann presso l'Università di Tecnologia di Vienna, e oggi database di riferimento per l'impiego dei robot in edilizia, con costante aggiornamento e mappatura dei robot nel mondo (fig. 18).

Grazie ai programmi di finanziamento europeo, sono nati i FabLab, cioè piccoli laboratori di sperimentazione macchine, a volte legati a realtà universitarie. Sebbene per alcuni di questi luoghi di ricerca sia difficile definire strettamente il confine d'azione, è possibile descrivere le tendenze di ricerca legate ai tipi lavorazione effettuati e talvolta ai materiali impiegati. Si ricostruisce così una geografia dell'automazione che richiama il concetto di **geografia delle macchine** (Marchis, 1994, p. 170), cioè l'impiego di strumenti diversi in funzione della società e della geografia del luogo, macchine create *ad hoc* per rispondere a bisogni specifici e che rispecchiano un'identità culturale[54].

In questo senso la progettazione e programmazione dello strumento robot ha un carattere fortemente artigianale, poiché collega il processo progettuale a quello esecutivo.

Cercando di descrivere tale nuova geografia delle macchine, è importante non dimenticare alcuni centri di ricerca come quelli sopra citati: Gramazio e Kohler presso l'ETH di Zurigo, che opera soprattutto nel campo strutturale e nel montaggio di elementi (finiti e non); l'Istituto IAAC di Barcellona (dal 2001) che impiega dati digitali per la ricerca di materiali innovativi, per la gestione urbana e delle risorse energetiche; l'IBOIS dell'EPFL, specializzato nelle

18. Robots in Architecture, l'associazione fondata nel 2010 Sigrid Brell-Cokcan e Johannes Braumann presso l'Università di Tecnologia di Vienna, dispone di un database che raccoglie i robot utilizzati per la ricerca in architettura, all'interno di atenei, laboratori e studi professionali. L'elenco riporta i nomi degli istituti e i modelli di robot in uso. La tabella accanto riporta i nomi delle istituzioni e mette in evidenza i Paesi del mondo con maggior numero di robot per la ricerca in architettura: USA, Australia, UK, Italia, Svizzera, Austria, Francia, Germania. L'iscrizione è libera: una volta verificata la presenza e l'utilizzo, il dato viene inserito nel database, accessibile online.

Istituto	Città	Paese
Queensland University of Technology, QUT Design Lab	Brisbane	Australia
RoboLogical	Canberra	Australia
Bond University, Abedian School of Architecture	Gold Coast	Australia
University of Tasmania	Hobart	Australia
RMIT	Melbourne	Australia
Monash University	Melbourne	Australia
University of Sydney	Sydney	Australia
Graz University of Technology	Graz	Austria
University of Innsbruck	Innsbruck	Austria
University for Arts and Design Linz	Linz	Austria
Robots in Architecture	Vienna	Austria
Vienna University of Technology	Vienna	Austria
University for Applied Arts Vienna - Institute of Art & Technology	Vienna	Austria
DL Robotics	Sao Paulo	Brazil
McGill University	Quebec	Canada
Studio Kimiis	Toronto	Canada
Universidad Adolfo Ibanez / FabLab Chile	Santiago	Chile
Universidad Técnica Federico Santa María	Valparaíso	Chile
DigitalCraft	Guiyang City	China
Archi-Union	Shanghai	China
NETME Centre	Brno	CZ
Aarhus School of Architecture	Aarhus	Denmark
Robot-Sapiens	Albi	France
EZCT Architecture & Design Research	Paris	France
CPMK	Paris	France
Ecole des Ponts ParisTech	Paris	France
Ludovic Mallegol	S. Leonard de Noblat	France
RWTH Aachen University	Aachen	Germany
Artis Engineering	Berlin	Germany
Responsive Design Studio / Cologne University of Applied Sciences	Cologne	Germany
DDU, TU Darmstadt	Darmstadt	Germany
University of Stuttgart, Institute of Computational Design	Stuttgart	Germany
University of Hong Kong	Hong Kong	Hong Kong
Bezalel Academy of Arts and Design	Jerusalem	Israel
ALO	Elmas	Italy
Politecnico di Milano	Milan	Italy
Caracol Design Studio	Milano	Italy
WeMake Makerspace	Milano	Italy
digifabTURINg	Turin	Italy
FABLAB Venezia	Venice	Italy
Keio University SFC	Fujisawa	Japan
Universidad Iberoamericana Puebla	Puebla	Mexico
Universidad Anáhuac	Querétaro	Mexico
Kinetica	Santa Catarina	Mexico

Istituto	Città	Paese
R MAS E Arquitectos	Temascalcingo	Mexico
University of Michigan	USA	Michigan
Hyperbody Robotics Lab	Rotterdam	Netherlands
Snøhetta	Oslo	Norway
NTNU	Trondheim	Norway
MoCoPolis	Warsaw	Poland
University of Porto - Digital Fabrication Lab / FAUP	Porto	Portugal
idz arhitectura	Bucharest	Romania
University of Novi Sad	Novi Sad	Serbia
IaaC	Barcelona	Spain
Chalmers University of Technology	Gothenburg	Sweden
HyperWerk HGK FHNW	Basel	Switzerland
Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau	Biel	Switzerland
ERNE AG Holzbau	Stein	Switzerland
ETH Zurich, Architektur und Digitale Fabrikation	Zurich	Switzerland
Bendilicious	Zurich	Switzerland
FABB	Istanbul	Turkey
Yasar University Maker Lab	Izmir	Turkey
American University of Sharjah	Sharjah	UAE
Cardiff University	Cardiff	UK
Architecture Association School of Architecture	Hooke Park	UK
Robofold	London	UK
Conrad Shawcross	London	UK
Blueberry Studio	London	UK
London South Bank University	London	UK
University of Arkansas	Arkansas	USA
Guy Martin Design	California	USA
SCI-Arc	California	USA
University of Virgina	Charlottesville	USA
Kent State University	Kent	USA
UCLA	Los Angeles	USA
Texas Tech University	Lubbock	USA
Quarra Stone	Madison	USA
Harvard University	Massachusetts	USA
Massachusetts Institute of Technology	Massachusetts	USA
Radlab Inc.	Massachusetts	USA
Ball State University	Muncie	USA
New York City College of Technology	New York	USA
Pratt Institut	New York	USA
Neoset Designs Inc.	New York	USA
Carnegie Mellon University	Pennsylvania	USA
Greyshed	Princeton	USA
Bot and Dolly	San Francisco	USA
Charles Aweida	San Francisco	USA
University of Washington	Seattle	USA
Branch Technology	Tennessee	USA



19.Uno degli spazi interni del Fablab Venezia presso il Vega Park di Venezia: sullo sfondo il braccio robotico ABB IRB 1600. Nell'area del Nordest, risulta essere l'unico istituto con braccio robotico ad uso sperimentale in architettura.

costruzioni in legno. Nel territorio italiano il numero di unità di ricerca per l'impiego della robotica in architettura è più ridotto e concentrato soprattutto nei centri urbani più importanti, così come accade anche per i FabLab (fig. 19).

Questa rete, oltre ad essere una base per la ricerca scientifica, costituisce anche un ambiente in cui differenti realtà professionali possono entrare in contatto con le tecnologie di ultima generazione, quali le stampanti 3D e i bracci robotici. Sebbene siano proprio in Italia alcuni dei maggiori produttori internazionali di robot (COMAU di Torino), macchine CNC (SCM Group di Rimini) e stampanti 3D (WASP di Ravenna), la manifattura edilizia è ancora lenta ad acquisire le nuove tecnologie nella propria filiera, per ragioni sia di natura economica che culturale.

La trasformazione tecnologica in corso non può essere evitata e, soprattutto, è dannoso ignorarla; non è possibile prevedere i tempi ma è certo che il rapporto di subordinazione dell'architettura nei confronti dell'industria muterà: "Se l'indirizzo post-moderno privilegia la fase compositiva dell'edificio, favorendo la dimensione morfologica a scapito della soluzione tecnica, nel settore dell'industrializzazione edilizia invece, il rapporto fra il progetto e le tecniche esecutive è il riferimento maggiore mentre la definizione formale è ordinariamente subordinata. Tutti e due i consolidamenti teorici, così come si sono configurati nei primi anni '80, mostrano carenze sostanziali, né d'altro canto è sufficiente una semplice sintesi fra queste due opposte tendenze. Che le proposte dell'architettura post-moderna, cioè, possano in qualche modo risollevare la produzione edilizia industrializzata occupandosi di riqualificazione formale appare, francamente, un'ipotesi improbabile" (Nardi, 1992, p. 70). La produzione edilizia industrializzata sta trovando nuova definizione e necessita di un'affermazione di senso da parte del progetto: la manifattura digitale è potenzialmente innovativa, ha la capacità di rispondere puntualmente ai desiderata, ma la qualità del prodotto finale è determinata dal progetto ed è funzione dello sviluppo di un pensiero architettonico non condizionato dagli strumenti produttivi[55]. Rispondere puntualmente, quindi fare dell'automazione un processo capace di differenziare ogni artefatto da quelli che vengono fabbricati prima e dopo (Kieran e Timberlake, 2004, XXII), significa anche soddisfare esigenze sociali, numerose e differenti, e produrre in quantità consone[56]. Quindi il processo di evoluzione ed innovazione degli stru-



20. Interno del laboratorio presso l'ICD Institute for Computational Design and Construction, fondato nel 2008, all'interno dell'Università di Stoccarda.

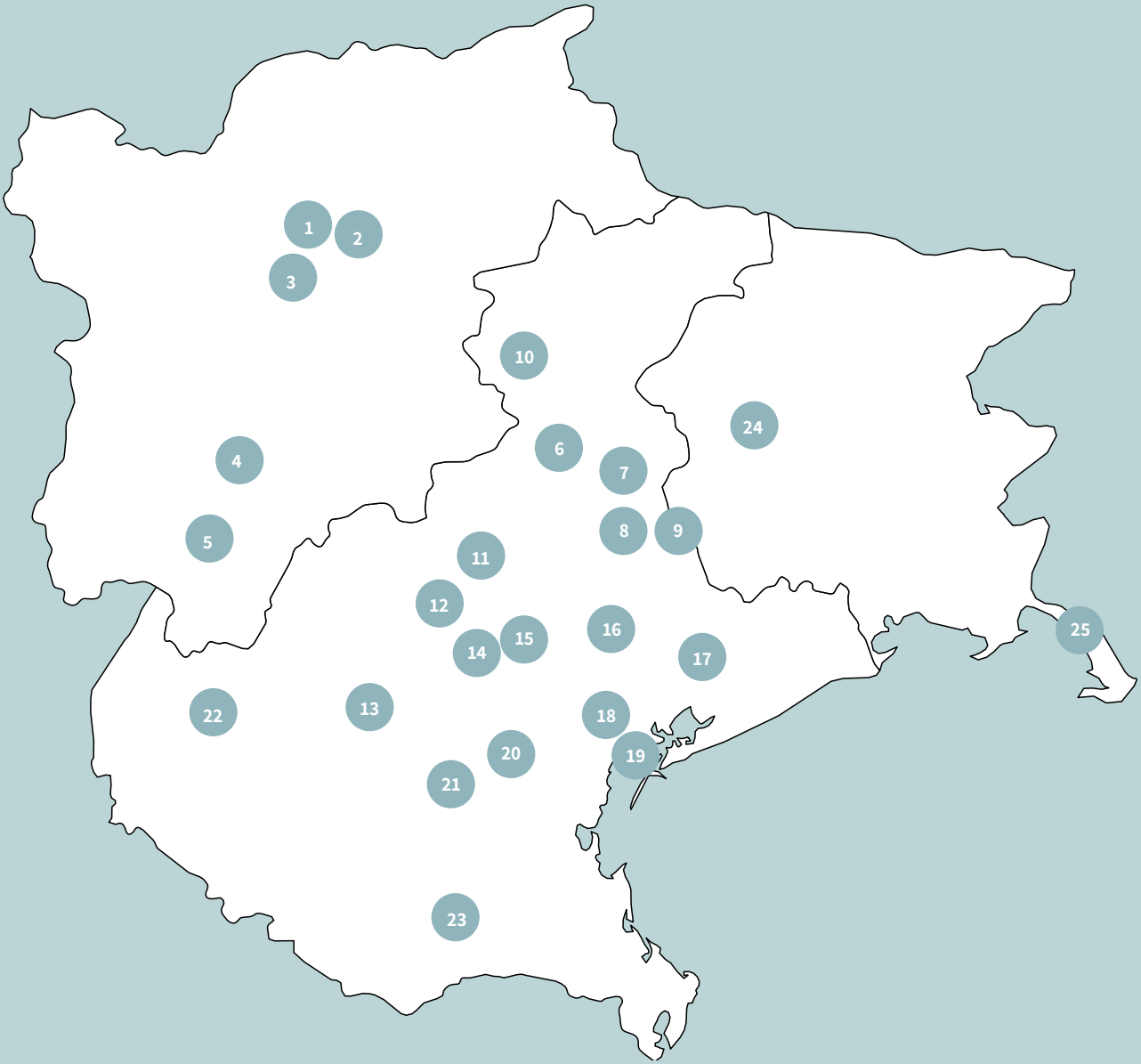
menti della digitalizzazione e del progetto digitale si evolve smettendo di considerare l'automazione come uno strumento per realizzare quantità, e riconoscendo il merito dell'automazione nella ricerca di più elevate qualità. Questa dinamica è mossa dalla ricerca di più alti livelli di qualità, ed è lo stesso motore che ha mosso W. Gropius e K. Wachsmann nella definizione del progetto *Packaged House*. Il *Packaged House* era più di un semplice progetto, era un sistema costruttivo sviluppato e calibrato sugli strumenti utili allo sviluppo di una produzione standard. Furono proprio la distanza tra gli standard architettonici espressi dal progetto, le possibilità industriali di sviluppo delle parti e le esigenze sociali in divenire la causa del fallimento dell'impresa (Kieran e Timberlake, 2004, p. 105). Oggi l'automazione offre strumenti che possono potenzialmente ridurre questa distanza: la "corretta industrializzazione edilizia" (Nardi, 1992) richiede che progettazione e produzione comunichino, e che in ciascuno di essi "siano riconoscibili i valori sociali e umani" (Nardi, 1992), successo che dipenderà esclusivamente dalla capacità progettuale dell'architetto (Gropius, 1955, tr. it. 1959, p. 182).

FABLAB

Il concetto di FabLab nasce al MIT di Boston come componente educativa del Center for Bits and Atoms (CBA). Un FabLab è un laboratorio di prototipazione tecnica per l'innovazione lo sviluppo di invenzioni, che fornisce stimoli e supporto per l'imprenditoria locale. Allo stesso tempo un FabLab è anche una piattaforma per l'apprendimento: un luogo in cui giocare, creare, imparare, insegnare e inventare. Essere un FabLab significa connettersi a una comunità globale di studenti, tecnologi, ricercatori, maker e innovatori: una rete di conoscenze che copre oggi oltre 30 paesi in tutto il mondo, oggi connessi da un network globale. Generalmente ogni FabLab è dotato di strumenti di fabbricazione digitale (dalle stampanti 3D, al taglio laser, macchine CNC e bracci robotici) e offre servizi di progettazione, prototipazione e produzione su misura mediante l'uso di software open source.
Originariamente concepiti per le comunità come piattaforme di prototipazione per l'imprenditoria locale, i FabLab sono sempre più coinvolti in progetti educativi con le scuole: gli utenti imparano progettando e creando oggetti di interesse personale stimolati dalla possibilità di creare qualcosa da soli e acquisendo in tal modo la conoscenza delle macchine, dei materiali, del processo di progettazione che va all'invenzione e all'innovazione.
In Italia la rete dei FabLab conta oltre 156 strutture, distribuite su tutto il territorio nazionale, con una concentrazione maggiore nel nord e nel centro del Paese ma con una buona diffusione anche in Puglia e nelle isole maggiori.



La mappa dei 156 FabLab italiani registrati sul portale fablabs.io. Come è possibile notare la distribuzione a livello nazionale è piuttosto ampia con una massima concentrazione in Veneto, Lombardia, Emilia Romagna e Lazio.
fonte: www.fablabs.io



Dettaglio della mappa dei 25 FabLab del Nordest.

1. BITZ unibz fablab
2. Makerspace Bolzano
3. NOI makerspace
4. MUSE fablab
5. Witlab Rovereto
6. FabLab Impresa Belluno
7. FabLab Vittorio Veneto + FabCube
8. FabLab Conegliano
9. Loudlab
10. Dolomiti Concept Lab
11. FilippinFabLab - F2L
12. Fab Lab Bassano
13. FabLab Vicenza
14. Fab Lab Castelfranco Veneto
15. Maker Lab
16. FabLab Treviso
17. Crunchlab
18. Fablab Venezia
19. DEL_Fablab
20. Officine ZIP - FabLab Padova
21. FabLab Padova
22. Verona FabLab
23. PoPlab
24. FAB.LAB INNOVA FVG
25. ICTP Scientific Fabrication Laboratory (SciFabLab)

Note

1 Alcuni centri di ricerca europei: ActLab del Politecnico di Milano; INDEXLAB del Politecnico di Milano; Gramazio Kohler Research ETH Zurigo; IBOIS EPFL Losanna; ICD Stoccarda; IAAC Barcellona, IBOIS presso EPFL di Losanna.

2 Per approfondire si veda il capitolo uno "L'automazione e i robot".

3 cfr. "Qualità e affidabilità edilizia" di Vittorio Manfron, 1995. Per approfondire il tema che pone in relazione la qualità del manufatto finale con gli strumenti di lavoro, si veda il paragrafo 3.9 Headmade.

4 François Hennebique aveva probabilmente conosciuto l'esperienza di Joseph Monier sul calcestruzzo all'Esposizione Universale del 1867: quest'ultimo depositò un brevetto sul calcestruzzo nel 1878, ma fu conosciuto solamente dopo decenni la pubblicazione del brevetto di Hennebique. Ad oggi la paternità del calcestruzzo armato è riconosciuta a Monier.

5 In Francia l'Amministrazione ha introdotto una serie di norme per monitorare e coordinare la costruzione di alloggi pubblici e privati, soprattutto per garantire un minimo di qualità e funzionalità degli alloggi. È proprio questo fattore a contribuire allo sviluppo della prefabbricazione in Francia per l'edilizia residenziale. In Italia invece la mancanza di organi di controllo ha permesso di sfruttare la prefabbricazione senza una garanzia di qualità: "Niente di tutto questo è avvenuto nella via italiana alla prefabbricazione. Qui da noi le imprese hanno preteso carta bianca e hanno preso il sopravvento su tutti gli altri protagonisti del processo della costruzione: sui committenti, spesso complici e ridotti al ruolo di ufficiali pagatori e su progettisti" (Sinopoli, 2002, p. 29).

6 Con la legge numero 43 del 28 febbraio 1949 il Parlamento italiano approvò i "Provvedimenti per incrementare l'occupazione operaia, agevolando la costruzione di case per lavoratori". Questo Piano rimase operativo per quattordici anni ed era volto alla realizzazione di alloggi sani e sicuri ma, in primo luogo, era lo strumento scelto del governo De Gasperi per affrontare il problema della disoccupazione: lo sviluppo del settore edilizio per la rinascita economica dell'Italia (La grande ricostruzione. Il piano INA-Casa e l'Italia degli anni Cinquanta, a cura di P. Di Biagi, Roma 2001).

7 Sistema costruttivo brevettato da George Washington Snow (1797-1870) nel 1833 a Chicago.

8 "È utile ricordare quale sia il significato da dare al vocabolo industrializzazione dal momento che in edilizia il termine è usato spesso in modo ambiguo. Ambiguità nata forse dal fatto che i diversi luoghi di produzione degli elementi costitutivi o delle diverse parti sono disgiunti da quelli del montaggio definitivo: si distinguono così due fasi, quella della fabbricazione che può essere manuale, artigianale, industriale e quella del montaggio che può essere pure manuale, artigianale, industriale, ma che può anche non essere omogenea con le caratteristiche di produzione degli elementi o delle parti usate. È forse per questo che, nella letteratura, spesso ai vocaboli 'razionalizzazione dei modi di produzione', 'prefabbricazione', 'industrializzazione' non fanno ancora riferimento a campi semantici differenziali. Per 'industrializzazione' si intende la strutturazione o la trasformazione conformata sul modello industriale: la strutturazione o la trasformazione, quindi del sistema di produzione determinata da profonde innovazioni tecniche seguite al potenziamento, ottenuto mediante l'introduzione dell'uso delle macchine utensili, delle aziende artigianali. Industrializzazione non significa quindi eseguire a mano, in luogo diverso dal cantiere di edificazione, i lavori di fabbricazione degli elementi costitutivi o analogamente produrre in serie e artigianalmente; come neppure razionalizzare la produzione, azione del resto possibile anche nell'artigianato" (Nardi, 1980, pp. 98-99). L'autore per la definizione di 'industrializzazione', fa riferimento alle voci industria, industriale, industrializzazione del Grande dizionario della lingua italiana a cura di Salvatore Battaglia (Torino, 1972).

9 "Any customer can have a car painted any colour that he wants so long as it is black" (Ford, 1922, p.72).

10 "[…] sistemi che danno la possibilità di porre in cantiere parti edilizie costruite e coordinate tra loro in modo unico e predeterminato (non è necessaria una normativa riguardante le parti perché le prestazioni vengono fissate di volta in volta in ogni capitolato d'appalto)" (Nardi, 1980). La ratio produttiva predomina sulla ratio progettuale, finendo così per invadere i campi di competenza propri del progettista (Nardi, 1992).

11 "[…] che dà la possibilità di porre in cantiere parti edilizie (componenti pronti a catalogo) capaci di inserirsi in qualsiasi edificio sia esso di nuova costruzione o già esistente (è necessaria una normativa che riguarda le prestazioni e le connessioni)" (Nardi, 1980).

12 "Se i modelli più diffusi di case prefabbricate sponsorizzate dal governo [statunitense] ebbero un grande successo commerciale, anche grazie a strategie di marketing e di comunicazione molto accurate […] esse tuttavia presentavano il fianco a non poche critiche a proposito della loro scarsa solidità e resistenza rispetto a tipologie tradizionali. Infatti […] i giornali si riempivano di vignette satiriche che schernivano l'inconsistenza di case composte da pareti sottili come fogli di carta, che spesso e volentieri presentavano qualche difetto opportunamente 'caricato' dai disegnatori." (Neri, 2015, p. 164) Il caso del Quonset Hut è "il simbolo involontario delle speranze risposte dalla cultura architettonica del Novecento nel mito della prefabbricazione, e di conseguenza anche delle sue delusioni" (Neri, 2015, p. 159).

13 Ad esempio il sistema detto "tunnel" che prevede l'impiego di cassaforme IBE con movimentazione idraulica automatica. Questo sistema costruttivo pesante è stato largamente impiegato tra gli anni '70 e gli anni '80 e "ha dato il necessario e calibrato impulso alla industrializzazione

edilizia residenziale; [i sistemi costruttivi pesanti] hanno tuttavia lasciato dei segni indelebili e dei condizionamenti nell'immagine della città […] il tunnel si pone come vincolo allo sviluppo planimetrico dell'organismo abitativo costringendo le strutture in setti trasversali (o longitudinali) con luci di dimensione possibilmente costante e andamenti compatti, pena la non competitività del costo dell'intervento rispetto allo stesso realizzato con altre tecnologie"(Maccolini, Zaffagnini, 1981, p. 88).

14 I sistemi più conosciuti all'epoca sono Balency, Camus, Coignet (calcestruzzo) e Barets, Fiori, Costamagna (calcestruzzo e laterizio).

15 "Questa dittatura della tecnologia sull'architettura è un fattore che avvertiamo soprattutto noi in Italia e che ha attraversato un momento veramente tragico negli anni Sessanta quando si pensava che tutto andava progettato sulla base di ciò che suggeriva la prefabbricazione pesante; a conseguenza di ciò ecco i giunti esibiti in una forma brutale, l'eliminazione assoluta di tutto ciò che poteva essere d'intralcio alla produzione, la scelta della via sempre e comunque più rapida e più economica. O addirittura – ricordo – l'introduzione della casseratura a tunnel: tutte tecniche e operazioni che una volta giunte in Italia, in Francia già non si usavano più. Proprio in Francia, negli anni Sessanta l'industrializzazione edilizia si esprimeva attraverso forme che lasciavano fin troppo arbitrio agli architetti; si prefabbricavano cose e oggetti incredibili, nel senso della più assoluta arbitrarietà." (Portoghesi, 2004, pag. 98).

16 Guido Nardi (1992) distingue la cultura del prodotto interno e la cultura dei prodotti assemblati nelle relazioni, che rispettivamente si occupano di tecniche di produzione e di tecniche di assemblaggio.

17 La ricerca di Wachsmann nella progettazione di giunti flessibili è molto approfondita: egli stesso dichiara che lo studio di questi sistemi è stato "compagno fedele" durante il difficile periodo in Europa durante il Nazismo, poco prima di emigrare in America e incontrare nuovamente Gropius (Herbert, 1984).

18 Guido Nardi (1992), fa riferimento agli articoli pubblicati da Giuseppe Ciribini e Enzo Frateili (p. 60): "In questi anni è opinione comune fra i ricercatori e operanti nel settore della prefabbricazione che sia meglio adottare componenti il cui grado semantico sia di tipo neutrale, per non determinare aprioristicamente l'immagine architettonica."

19 Stime elaborate dal rapporto ANCE, 2018.

20 cfr. 2° Rapporto Case ed edifici in legno, Assolegno 2017.

21 Ivan Sutherland (1938) è un informatico statunitense, ideatore di interfacce per programmi digitali e degli occhiali per la realtà virtuale.

22 Il termine è stato introdotto dall'architetto Greg Lynn negli anni Novanta, reinterpretando un processo progettuale già proposto da Archigram e da altri progettisti autori di un'architettura organica.

23 La funzione dei sensori di un robot può essere ripartita in due categorie principali: stato interno e stato esterno. I sensori dello stato interno riguardano la misura di variabili usate per il controllo del robot (i sensori interni misurano, ad esempio, la posizione reciproca dei giunti del braccio robotico). I sensori dello stato esterno misurano variabili (quali la distanza, la prossimità e il tatto) utili alla percezione del mondo esterno al robot e sono utilizzati per guidare il robot nello spazio oltre che per l'identificazione degli oggetti e la loro manipolazione.

24 Thomas Bock è professore dott. Ing. alla Technische Universität München ed è uno dei maggiori esperti nel settore della robotica per l'edilizia. È autore con Dr-Ing. Thomas Linner di una serie di libri dedicati a questo tema: Bock T., Linner T., "Robot-oriented design: design and management tools for the deployment of automation and robotics in construction", Cambridge University Press, Cambridge, 2015; Bock T., "Robotic industrialization: automation and robotic technologies for customized component, module, and building prefabrication", Cambridge University Press, Cambridge, 2015; Bock T., Linner T., "Site automation: automated/robotic on-site factories", Cambridge University Press, Cambridge, april 2016; Bock T., Linner T., "Construction Robots. Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots", Cambridge University Press, Cambridge, 2016.

25 Per approfondire questo tema si vedano soprattutto le sue pubblicazioni "Construction Robots" (2016) e "Site Automation" (2016).

26 Shimizu Corporation operano infatti nel settore costruttivo e nell'automazione in cantiere, con lo sviluppo di robot STCR per specifiche operazioni (Shimz Smart Site).

27 Il termine Robot Oriented Design (ROD) è un concetto sviluppato da Thomas Bock all'Università di Tokyo sotto la supervisione del Prof. Yositika Uchida.

28 Thomas Bock and Thomas Linner, Construction Robots. Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots, Cambridge: Cambridge University Press, 2016, p. 297.

29 I supporti sono parti stampate esclusivamente con l'obiettivo di sostenere il restante materiale stampato del prodotto, che necessita di un appoggio sia durante l'asciugatura, che nel corso di tutta la stampa per la forza di gravità e il rischio di rottura. I supporti possono avere conformazioni differenti, tendenzialmente sono elementi reticolari, per offrire la massima rigidità con il minor materiale possibile. Le parti di supporto possono essere tolte una volta asciugato il prodotto.

30 I tempi di deposito sono determinati dal tempo di asciugatura del materiale affinché su di esso possa essere depositato lo strato successivo, senza che questo ne comprometta la stabilità.

31 Le ricerche in questo ambito sono ampiamente sviluppate nel settore biomedico per la produzio-

ne di protesi e nel settore areospaziale: nel 2016 è stata prototipata la prima stampante a gravità zero, quindi una stampante capace di produrre nello spazio elementi per la realizzazione di stazioni spaziali.

32 I primi robot sono stati realizzati per la verniciatura e successivamente per l'assemblaggio: la così detta Motor Valley dell'Emilia Romagna è infatti nota per le aziende automobolistiche, ma soprattutto per la ricerca e l'automazione che viene sviluppata in funzione di essa. Non è un caso infatti che sempre in quest'area geografica si concentrino tra i maggiori produttori di macchine e automazione per la produzione industriale, dalla torinese COMAU alla riminese SCM, l'uno produttore di robot, l'altro di macchine utensili e CNC, entrambi leader mondiali nel proprio settore.

33 Per approfondire si veda "Il braccio robotico", pag. 31.

34 Per approfondire si veda il capitolo uno "L'automazione e i robot".

35 Si veda il caso specifico di Adidas Futurecraft, in cui la tecnologia più avanzata combinata con l'elaborazione dei dati dell'acquirente, viene applicata per sviluppare una scarpa su misura, al dettaglio del micron.

36 La scuola del Bauhaus è stata fondata a Weimar nel 1919. Dal 1919 al 1925 con Walter Gropius a Weimar; a Dessau dal 1925 al 1932, con Walter Gropius (1925 - 1926), Hannes Meyer (1928-1930), Mies van der Rohe (1930-1932); infine a Berlino dal 1932 al 1933, anno di chiusura definitiva, con Mies van der Rohe.

37 "I modelli standard elaborati nelle officine del Bauhaus saranno prodotti in serie da fabbriche esterne, con cui le officine si manterranno in collaborazione. La produzione del Bauhaus non rappresenta quindi una concorrenza per l'industria e per l'artigianato, ma piuttosto fornisce loro un nuovo fattore costruttivo. Il Bauhaus avvia infatti alla vita produttiva ed economica uomini dotati di capacità creative e di un'esperienza pratica che solleveranno l'industria e l'artigianato dal lavoro di preparazione che deve necessariamente precedere la produzione. Gli oggetti prodotti sulla base di modelli forniti dal Bauhaus dovranno il loro basso prezzo esclusivamente all'utilizzazione di tutti i mezzi moderni, economi, della standardizzazione (produzione in serie a opera dell'industria) e alla vendita in grandi quantità. Si cercherà di scongiurare in tutti i modi il pericolo di uno scadimento dei prodotti, nei materiali o nella esecuzione, rispetto ai modelli" (Wingler, 1987, p. 192).

38 Il concetto di fabbrica a luci spente è stato introdotto da Roger B. Smith nel 1982, con il progetto di rilancio di uno degli stabilimenti produttivi della General Motors, società di cui allora era presidente. Il progetto preveda puntava ad aumentare la produzione nello stabilimento di Saginaw Vanguard attraverso macchine capaci di operare nell'oscurità (robot e simili): da qui l'idea di una fabbrica a luci spente (Briant, 1992).

39 Sono prodotti standardizzatati più o meno complessi, realizzati al fine di agevolare il lavoro del progettista nelle complessità del processo architettonico, che permettevano di ridurre i tempi di lavorazione e quindi anche i relativi costi.

40 In antropologia culturale, si riferisce al legame tra l'azione della tecnica e il contesto culturale in cui esso si sviluppa, quindi agli aspetti cognitivi: questi studi afferiscono alla sfera della antropologia delle tecniche.

41 Il termine "tacita conoscenza" è stato utilizzato da Richard Sennet nella sua pubblicazione dedicata al lavoro artigiano (L'uomo artigiano, Feltrinelli, Milano, 2008, titolo originale The Craftsman, Yale University Press, London, 2008). Il termine è stato utilizzato per la prima volta nel 1966 dal filosofo ungherese Michael Polanyinel per l'omonima pubblicazione The Tacit Dimension, ma è stato diffuso soprattutto nel 1995 attraverso la pubblicazione di Ikujiro Nonaka e Hirotaka Takeuchi The Knowledge Creating Company.

42 La visione artigianale della materia si intende qui legata soprattutto all'idea del tempo, nell'artificio della lavorazione ma soprattutto nel tempo della natura (per approfondire si veda il paragrafo 3.9 Headmade).

43 "Architettura diffusa" e "architettura monumentale" sono i concetti identificati da Guido Nardi per indicare un'architettura frutto di una collettività sociale e una invece di un'individualità (Nardi, 1994).

44 Con robot a base fissa si intende un braccio robotico che durante le operazioni è incastrato sul piano e dispone dei gradi di libertà propri della struttura del braccio.

45 Con robot a base mobile si intende un braccio robotico che si muove, ad esempio, impiegando una serie di binari a terra.

46 Con "platform frame" si indica un sistema strutturale simile al "balloon frame", ovvero un telaio composto da aste di sezione inferiore ai 10 cm, disposte a distanza di 60 cm, a formare una struttura che richiama la figura di una gabbia.

47 Aste in metallo per un telaio leggere (Lightweight metal structure, 2014-2018, progetto in collaborazione con NCCR Digital Fabrication research project) e aste in legno con teste già sagomate (Spatial Timber Assemblies, 2014-2018, Gramazio Kohler Research, ETH Zürich and ERNE AG Holzbau): in entrambi i casi il collegamento viene fatto manualmente, sia la saldatura nel caso del metallo che l'impiego di connettori nel caso del legno.

48 Il progetto dell'Università di Padova IT-Robotics opera proprio nel campo della sensoristica per l'impiego in ambito industriale: i sensori impiegati utilizzano il riconoscimento fisico per individuare la corretta posizione degli elementi nella linea di produzione e sviluppare dei sistemi di conformità e controllo morfologico. Si tratta di un sistema applicato a livello industriale, ma potenzialmente integrabile in un processo di montaggio architettonico, spesso caratterizzato da elementi differenti.

49 La combinazione di robot e carrucole automatiche è un sistema impiegato per la manutenzione e pulizia delle facciate dei grattacieli.

50 Vedi nota 16, capitolo due.

51 Giuseppe Ciribini (Ciribini, 1965, p. 19; 1984, p. 16) descrive la trasformazione delle macchine impiegate per la produzione di componenti edili in relazione al grado di autonomia dall'uomo in 10 classi (da A0 a A9), che si possono riassumere in 3 macro categorie:

-macchine utensili e macchine semiautomatiche (A0, A1, A2);

-macchine con capacità ripetere cicli produttivi, come macchine trasnsfer e CNC (A3, A4 A5, A6);

-macchine capaci di "ideare" e sostituire l'intelletto dell'uomo (A7, A8, A9).

52 È la programmazione digitale a utilizzare degli standard, così definiti anche "soft standard": si tratta di caratteri puramente digitali e legati ai processi, non riconoscibili nel prodotto finale (Gramazio e Kohler, 2014, p. 189).

53 Intervento dell'architetto Vicente Guallart, fondatore dell'Istituto IAAC di Barcellona (ReBuild 2017, Rovereto TN).

54 "Nei viaggi di Daniel Defoe si fa riferimento a città e villaggi che, in base alla localizzazione di risorse e mercati, si specializzano in modelli e qualità di prodotti specifici e acquistano in maestria e prestigio. Nel Midland la produzione di chiodi viene ripartita su 20 'distretti', ciascuno dei quali produce un tipo di chiodo differente. Anche se l'innovazione tecnologica, prima della 'rivoluzione industriale', avveniva con ritmi certamente più lenti, non si deve supporre che questo sistema di industrializzazione fosse fisso, al contrario fu un costante stato di evoluzione. Sono proprio queste aree di localizzazione geografica a diventare il verme delle grandi aree industriali. Negli opifici, ancora legati alla tradizione artigianale, si sviluppano i primi rudimenti di suddivisione del lavoro, necessariamente legati alla progettazione di macchine 'speciali', in contrapposizione alle macchine 'universali'. In questo contesto economico-culturale nascono le prime esperienze per una cultura tecnologica e industriale, fortemente radicata sul territorio" (Marchis, 1994, p. 170).

55 Per approfondire si veda il paragrafo 3.9 Headmade.

56 La produzione su misura potrebbe in un futuro ideale anche riflettersi sulle quantità di produzione, ridefinendo il sistema capitalista sul quale oggi le economie e le società sono basate.

capitolo tre

L’automazione nella carpenteria lignea

capitolo tre

L’automazione nella carpenteria lignea

Il legno è sempre stato una risorsa preziosa, fin dall’antichità, e l’evoluzione degli impieghi e delle lavorazioni ha caratterizzato i territori oltre che le architetture. Le trasformazioni dell’uso del legno incorse nel Novecento hanno caratterizzato i processi di lavorazione, di produzione e molti aspetti del progetto. La carpenteria lignea per l’edilizia sfrutta oggi elementi in legno ed elementi a base di legno, ottenuti dall’assemblaggio di tavole, piallacci o fibre con l’impiego di colle. I prodotti che ne risultano sono più omogenei rispetto a un analogo elemento in legno massiccio e talvolta perfino più performanti. Tali prodotti hanno trovato e stanno trovando un diffuso impiego del legno in edilizia, anche in ambito strutturale. La disponibilità di queste tipologie di prodotti, è cresciuta di pari passo con l’evoluzione degli strumenti per la lavorazione materiale: gli utensili manuali sono stati meccanizzati, le macchine utensili sono state tra loro aggregate e trasformate in centri di lavorazione, dotati di un alto livello di autonomia, riducendo l’interazione dell’uomo con la materia.
Il capitolo individua le prospettive di sviluppo della carpenteria lignea a partire dal processo produttivo della materia prima e della sua evoluzione, analizzando gli strumenti per la lavorazione e declinando le prospettive di evoluzione futura in relazione alle esigenze di sostenibilità, durevolezza e durabilità. Tale analisi è supportata dall’individuazione di casi studio che si caratterizzano per gli aspetti della progettazione e della produzione di componenti strutturali in legno. La morfologia degli elementi, lo sviluppo in altezza di strutture, la tipologia di giunto tra componenti rappresentano i principali ambiti in cui è possibile riscontrare i passi dell’evoluzione delle costruzioni in legno. Tramite questi dettagli si esprime il valore dell’idea del progetto, a prescindere dalle tecnologie utilizzate per la produzione, che si tratti di un gesto produttivo eseguito da una mano o da un robot. A definire un prodotto è prima di tutto l’idea che esso esprime e che viene sviluppata attraverso la collaborazione tra progettisti: questo genere di prodotto è definito headmade.

L'impiego del legno nelle costruzioni ha una lunga storia e rimanda ad una serie di usanze e tradizioni locali relazionate a specifici contesti geografici e culturali[1]. La cultura materiale del legno nel corso della storia si trasforma, viene superata e dimenticata, oppure viene compresa, sviluppata e anche esportata al di fuori del contesto territoriale in cui è nata. Tale storia è possibile anche grazie alle tecnologie di lavorazione che hanno permesso di ampliare le potenzialità d'uso del legno[2] e la possibilità di separare le fasi di taglio da quelle di lavorazione, consentendo l'impiego del legno anche in contesti distanti dalle zone in cui esso cresce.

Il legno fin dall'antichità ha rappresentato una risorsa preziosa: è stato impiegato nel settore delle costruzioni per la sua resistenza e leggerezza, sia da popolazioni nomadi[3] che da quelle stabili, e ne è stato fatto ampio uso soprattutto per la costruzione di navi e di ponti. Disporre di reti infrastrutturali e flotte navali, garantiva la possibilità di commerciare con terre lontane e di accedere a risorse preziose, non solo materiali ma anche culturali. Per questo il legno non ha soltanto avuto un ruolo fondamentale nel settore delle costruzioni ma ha anche rappresentato un vero e proprio simbolo di forza e ricchezza per i popoli che erano in grado di sfruttarne le potenzialità[4].

Non è un caso che la carpenteria lignea edilizia abbia ereditato tecniche e conoscenze dal settore navale in termini di processi, lavorazioni, di sistemi costruttivi e di schemi strutturali. Ad esempio, lo scafo della nave viene rovesciato e impiegato per realizzare la copertura di ampi spazi, come quelli delle basiliche[5]: tra i più noti carpentieri della storia ci sono "gli arsenalotti di Venezia e i carpentieri di Bruges" (Laner, 2001, p. 22), esperti conoscitori del legno che doveva essere progettato e lavorato per resistere alle forze del mare aperto e non solo alla forza di gravità. I sistemi costruttivi in legno trovano ampio impiego anche in quell'architettura che Guido Nardi definisce come diffusa e spontanea, "propria della collettività" differente da quella monumentale, "propria dell'individualità e dell'avvenimento" (Nardi, 1994).

Le tecnologie impiegate si sono nel corso degli anni identificate con le tradizioni di specifici contesti geografici: è proprio l'architettura diffusa ad essere l'emblema della cultura materiale, su cui pone le sue basi anche l'architettura monumentale.

Un esempio di architettura diffusa in legno è il sistema costruttivo impiegato per le case a graticcio, molto diffuso nell'Europa Centrale. Il sistema a graticcio è caratterizzato da un telaio con aste in legno ravvicinate[6] e da tamponamento che ne costipa gli interstizi e che viene realizzato con materiali quali argilla, pietre e laterizi (a seconda delle zone in cui veniva impiegato e della disponibilità delle materie prime). In questo modo il telaio in legno non risulta rivestito e la disposizione delle aste disegna la facciata con un motivo geometrico, identificativo delle tradizioni costruttive delle differenti località.

Nei Paesi europei il sistema costruttivo a graticcio viene riconosciuto con vari nomi: è detto *fachwerk* in Germania, *pan de bois* oppure *colombage* in Francia, *timber framing* in Inghilterra, *Riegelhaus* in Svizzera. Ogni termine descrive una differente declinazione del sistema a graticcio, che si distingue dagli altri per le dimensioni degli elementi in legno, le tipologie dei collegamenti tra le parti, le aree degli interstizi, la presenza di decorazioni sugli elementi in legno: "Se è vero che questi modi, in cui ragioni costruttive e ragioni estetiche si compongono in modo inestricabile, ci danno un quadro delle diverse identità locali è anche vero che, nelle analogie e nelle opposizioni che coincidono con i confini stabiliti, ci danno modo di verificare la circolazione delle esperienze e la ricchezza di scambi e reciproche influenze proprie di ogni identità" (Portoghesi, 2001, p. 14). La struttura in legno esprime quindi un'identità architettonica che è connessa al territorio e la diffusione di un sistema costruttivo come quello a graticcio conferma come i Paesi che hanno utilizzato continuativamente i sistemi costruttivi in legno siano anche quelli che hanno saputo mantenere alta la disponibilità di materia prima: è il caso dell'Europa centrale per la presenza di larici e abeti bianchi, o nel Nord Europa, ricco di pini (fig. 01).



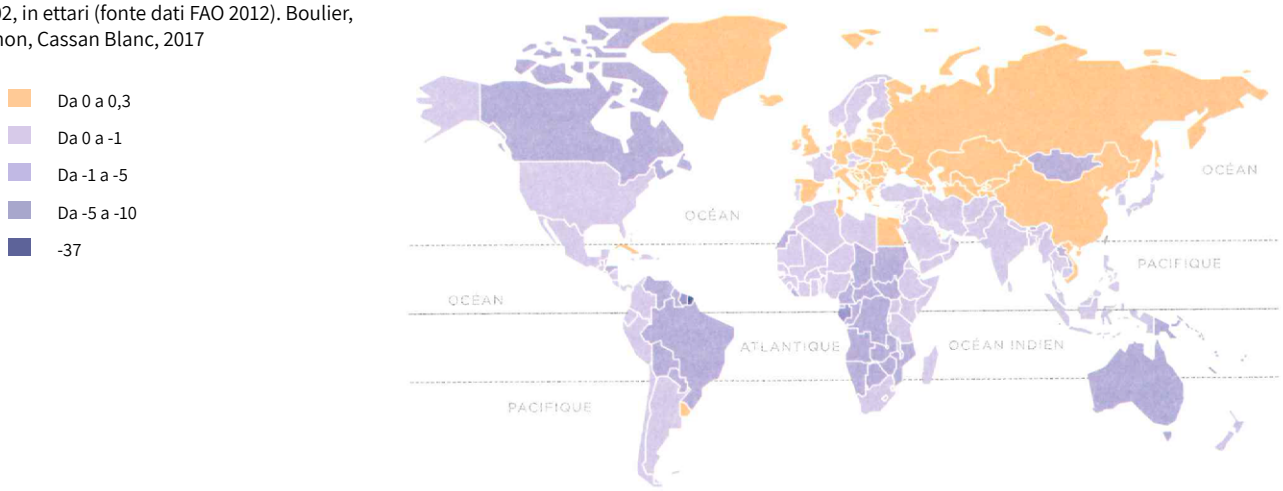
01. Casa a graticcio in Normandia, Francia.C00. pixabay

Nel corso della storia l'impiego del legno in edilizia ha subito numerose trasformazioni, passando dall'uso del materiale nella sua forma naturale (tipo trave ad uso fiume), alla produzione di elementi semilavorati (tipo tavole e listelli) per arrivare a prodotti più elaborati, la cui "invenzione" è dovuta soprattutto alla necessità di rispondere alla scarsa disponibilità della materia prima[7].

Le innovazioni tecnologiche dell'Ottocento hanno introdotto nuovi materiali e sistemi costruttivi, frutto delle tecnologie di lavorazione del ferro e dell'acciaio che hanno trovato ampia diffusione nel settore edile e hanno soppiantato l'impiego del legno, soprattutto in quei paesi in cui la risorsa primaria non era ampiamente disponibile[8]. Le esigenze di ricostruzione, sorte a valle delle guerre che hanno afflitto il Novecento, hanno contribuito alla ricerca di una maggiore rapidità di progettazione e di messa in opera, disincentivando ulteriormente l'impiego del legno e lasciando spazio ad altri materiali, come ad esempio il calcestruzzo armato e i laterizi, ampiamente utilizzati nel contesto italiano.

Il mercato delle costruzioni in legno in Europa ha registrato una ripresa a partire dagli anni Novanta, quando sono stati sviluppati e introdotti nel mercato i prodotti derivati del legno, in particolar modo il legno lamellare, ottenuto sovrapponendo e incollando tra loro tavole di legno[9]. A questo si aggiunge anche l'impulso dato dalle normative nazionali, che ha rappresentato un punto di riferimento per la regolamentazione della produzione e del controllo della materia prima e un supporto per i progettisti. In Europa, le normative nazionali hanno incentivato l'impiego del legno nel settore edile in maniera differente in ciascun Paese, ciò fino all'introduzione dell'Eurocodice 5 (1995), che ha contribuito ad armonizzare le normative all'interno dell'Unione Europea e ha incentivato l'utilizzo delle costruzioni in legno anche in quei Paesi in cui non erano ancora state promulgate normative adeguate.

02. Superficie forestale disponibile dal 1990 al 2002, in ettari (fonte dati FAO 2012). Boulier, Simon, Cassan Blanc, 2017



Fino agli anni Novanta, le normative erano anche molto differenti tra loro e, in alcuni casi, esse costituivano dei veri e propri piani economici statali per investire nella filiera del legno, fin dalle prime lavorazioni. L'Austria, il Paese europeo con la più alta concentrazione di foreste (fig. 02), costituisce un eccellente esempio di questa politica che è anche sostenuta da campagne pubblicitarie volte a sensibilizzare la popolazione sul valore della risorsa legno: tali campagne associano il legno a un'idea romantica (anni Settanta), sostenibile (anni Novanta), e infine a quella contemporanea di innovazione, con lo slogan "il legno è geniale"[10].

Ad oggi, è possibile constatare il successo delle costruzioni realizzate con prodotti a base di legno come i pannelli a strati incrociati tipo X-Lam o gli elementi in *Laminated Veneer Lumber* (LVL) per la realizzazione di telai[11]. Parallelamente, è rilevante registrare dall'introduzione di sistemi digitali per la lavorazione che, oltre a potenziare gli utensili in uso, contribuiscono ad ampliare le possibilità di lavorazione della materia[12].

Ogni descrizione del settore delle costruzioni in legno non può mancare di un riferimento al settore produttivo, dalla selvicoltura alla lavorazione del legname, fino allo smaltimento dei prodotti in legno e a base di legno: sono aspetti che si ripercuotono sulla qualità del materiale stesso[13], aspetti peculiari in un momento in cui la trasformazione della produzione può contribuire a valorizzare gli aspetti qualitativi derivanti dalla sua natura. Le considerazioni in merito alla sostenibilità e alla durabilità del legno non si riferiscono esclusivamente alla messa in opera dei componenti in legno, ma riguardano l'intero ciclo di vita degli edifici e delle parti che li compongono. Ciascun processo di questo settore può essere accompagnato da certificazioni e dichiarazioni volontarie, al fine di ricostruire l'iter di provenienza del legno e la lavorazione del prodotto (l'impiego di eventuali colle o la modalità di essiccazione), informazioni utili e talvolta necessarie per la selezione del materiale da utilizzare in opera e per eseguirne infine un appropriato smaltimento dei rifiuti[14].

Le dinamiche socio-economiche in atto stanno contribuendo a trasformare la filiera dell'architettura in legno; la fabbricazione digitale riveste un ruolo fondamentale nel ciclo di vita dell'elemento ligneo poiché ha influenza su ciascuno degli aspetti precedentemente elencati e ha la possibilità di divenire un nuovo fulcro per lo sviluppo del processo di produzione dei componenti lignei. Grazie

alla digitalizzazione possono essere messe a sistema tutte le informazioni legate al ciclo di vita del prodotto. Allo stesso modo, la fabbricazione digitale, grazie alla capacità di relazionare la materia con i processi digitali volti alla sua trasformazione, può contribuire a rafforzare le prospettive di sviluppo del legno e dei prodotti a base di legno in edilizia: i progettisti possono rielaborare i giunti tradizionali, sperimentare telai complessi e definire nuove possibili soluzioni di impiego del legno[15].

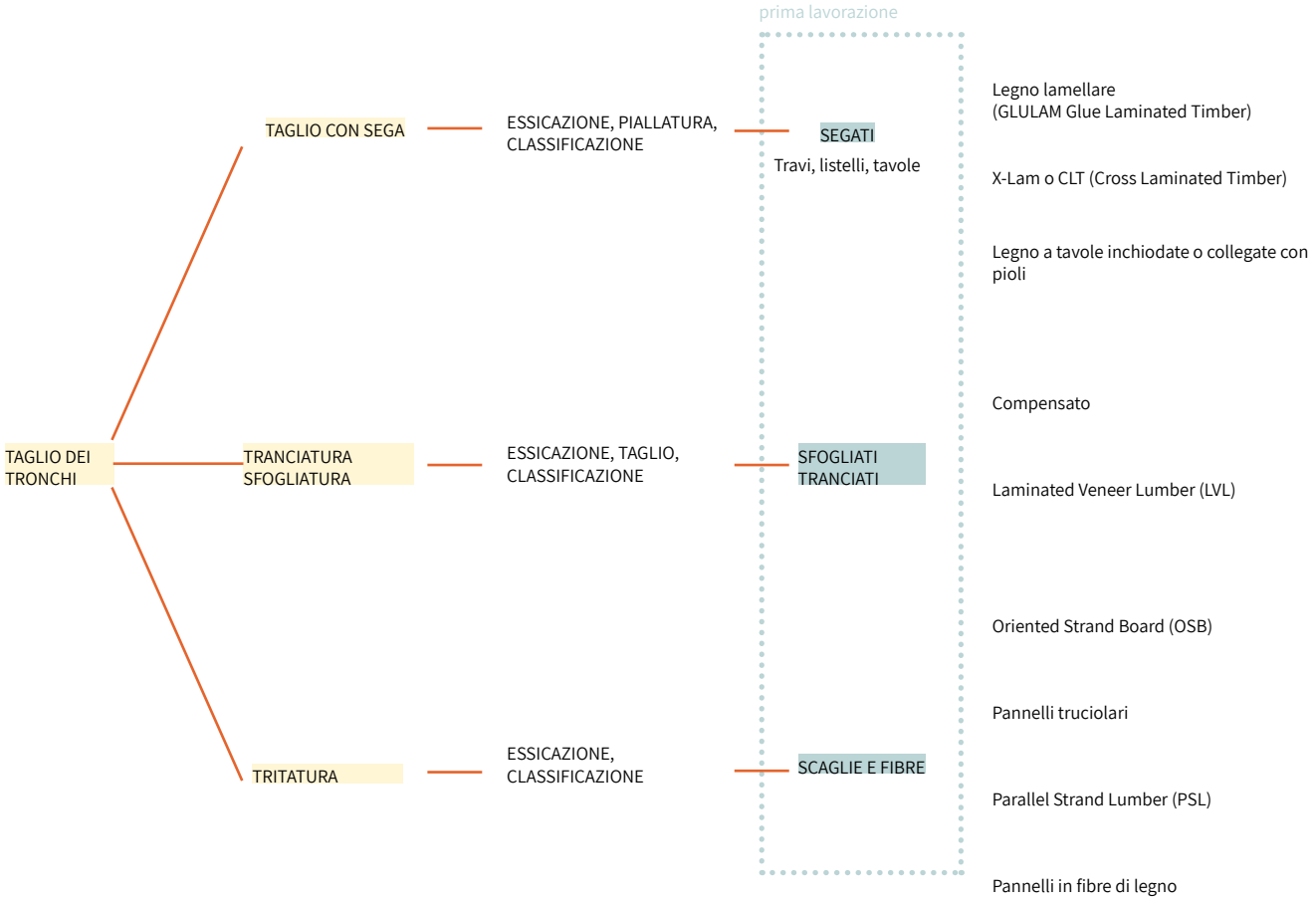
Nella trasformazione della produzione di componenti strutturali in legno per l'edilizia, la ricerca sottolinea il valore dell'idea proprio del progetto dell'architetto supportato dalla fabbricazione digitale[16], in cui il gesto della produzione assume una nuova connotazione e, da umano, diviene robotico.

3.1 Le lavorazioni del legno

La filiera del legno rappresenta uno dei settori in cui la meccanizzazione dei processi produttivi ha trovato presto una fertile e rapida applicazione. Materiale per costruzioni navali, prima che edili, la conoscenza del legno è diversificata, è riferita ai tempi lunghi della storia e connessa ai luoghi geografici, alle culture e alle tradizioni costruttive in cui il legno veniva impiegato. Nei tempi recenti, la manifattura del legno ha saputo progressivamente trasformarsi adattandosi allo sviluppo e diffusione dei processi di meccanizzazione e industrializzazione, come nel noto caso del sistema *Balloon Frame*. Questo sistema è stato brevettato nel 1831 a Chicago da George Washington Snow (1797-1870), che ha saputo rispondere alla necessità di un sistema costruttivo adatto alle esigenze dei coloni che andavano alla conquista del Nord America. Snow sfruttò i principi dell'industrializzazione e li applicò ad un sistema costruttivo già noto e conosciuto in Europa: comprese che alcune lavorazioni metallurgiche avrebbero trasformato il mercato della piccola carpenteria metallica[17] e sfruttò il legno, risorsa abbondante nei territori americani, come materia prima per il suo sistema.

Trasformare il legno in un prodotto adatto alle costruzioni edili comporta fasi e processi di lavorazione (fig. 03) che sono stati, nel tempo, imputati a specifiche figure professionali, specialisti o esperti artigiani, diversificando mansioni e ruoli anche in relazione al livello di complessità della lavorazione. Alcune di queste lavorazioni sono:

- il taglio del fusto. Questa procedura richiede l'intervento di specialisti per la complessità nel considerare i differenti parametri inerenti la natura del tronco e l'ambiente circostante: deve essere eseguito in funzione della caduta del tronco, senza danneggiare gli alberi circostanti e in modo da agevolare le operazioni di trasporto. Il taglio è oggi regolamentato da normative nazionali volte a tutelare le superfici boschive e per impedire il disboscamento;
- il taglio del tronco, eseguito *in situ* o in segheria. Questa fase è conosciuta come prima lavorazione del legno, da cui si ottengono i segati (travi, travicelli, listelli, panconi, tavole, assi e assicelle) oppure gli sfogliati e i tranciati, ciò altri prodotti di dimensione minore e prodotti derivati (trucioli o scaglie, particelle, fibre, cascami). Storicamente questa lavorazione era eseguita *in situ*[18], in seguito la lavorazione è stata trasferita in un luogo riparato, sfruttando macchinari utensili: è stato il primo spunto per meccanizzare e ottimizzare la produzione di questa categoria di prodotti e per



03. Lavorazione del legno e principali prodotti.

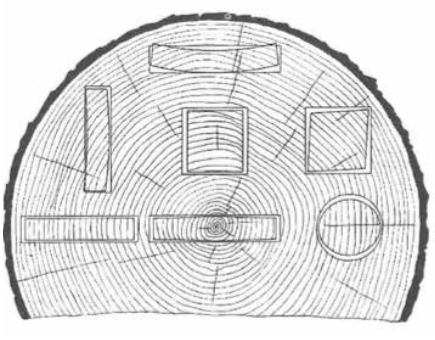
renderli anche più omogenei dal punto di vista dimensionale;

- il taglio e la ricomposizione dei prodotti ottenuti dalla prima lavorazione. Questa fase è conosciuta anche come seconda lavorazione e i prodotti che si ottengono sono sia di natura massiccia che ricomposta: nel primo caso vengono effettuate lavorazioni di pulitura e di riduzione dimensionale, nel secondo caso si utilizzano sfogliati, tranciati e trucioli per produrre nuovi prodotti a base di legno, come pannelli multistrati, pannelli truciolati, ecc.;
- il taglio e la modellazione di componenti lignei ottenuti dalla prima e seconda lavorazione, eseguiti in officina o in cantiere. In questo processo si effettua la modellazione di elementi puntuali e piani per renderli pronti per l'installazione in opera, si tratta di lavorazioni come la sagomatura per giunzioni e alloggio di carpenteria (lignea e metallica) o foratura dei pannelli.

La progressiva meccanizzazione delle lavorazioni del legno ha inciso sul luogo dell'intervento e sull'organizzazione del lavoro: il contributo delle macchine utensili ha dal principio permesso di rendere più efficiente la produzione di

componenti lignei, soprattutto velocizzando le fasi di taglio; oggi invece l'automazione è in grado di combinare al gesto dell'utensile, la percezione dei sensori, mantenendo costante la precisione nella fase di lavorazione del materiale.

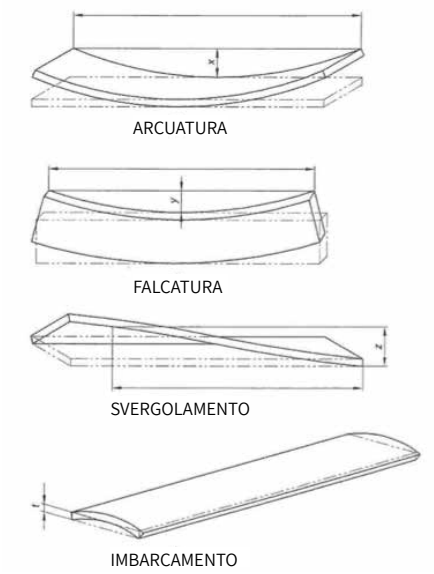
Nella filiera qui descritta devono essere incluse anche le fasi di riposo per il legno (fig. 06), utili ad ambientare la materia per l'impiego finale: l'essiccazione naturale o artificiale, per ridurre l'umidità contenuta nel legno e l'ambientazione in cantiere prima della messa in opera finale. Questi processi possono richiedere tempi molto differenti e a volte molto lunghi, a seconda dell'ambiente in cui si lavora e del tipo di specie lignea che si sta impiegando. Ciò si pone come un potenziale limite alle trasformazioni in atto nella filiera del legno, in quanto ogni fase di riposo è un passaggio necessario che organizza l'intero processo produttivo determinandone alcune tempistiche. Anche per superare questo limite, il settore del legno ha visto una crescente spinta verso l'industrializzazione e la conseguente automazione dei processi; ciò ha portato gradualmente ad accorpare le varie attività di lavorazione in compartimenti e distretti, organizzando così l'intera produzione in comparti industriali volti a minimizzare le fasi di trasporto, movimentazione e stoccaggio dei semilavorati in legno.



04. Deformazioni che si possono verificare nei segati radiati e tangenziali in relazione al punto in cui viene eseguito il taglio (lo spazio bianco attorno a ciascun elemento indica il possibile ritiro anisotropo). Giachino, 2013

3.2 La classificazione degli elementi in legno

Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) pubblicate nel 2008 classificano i prodotti in legno (legno massiccio, legno strutturale con giunti a dita, legno lamellare incollato, pannelli a base di legno e altri) ma non contribuiscono a definire la relazione tra tipo di lavorazione che il legno subisce e il suo impiego come elemento edile. I prodotti finali possono essere classificati come in legno o a base di legno, questi secondi contengono altre sostanze stabilizzanti, come le colle: entrambe le tipologie di prodotti devono riportare la marcatura CE[19] affinché possano essere commercializzati all'interno dell'Unione Europea. Questi prodotti possono essere ulteriormente classificati come elementi strutturali o non strutturali e solo quelli ad uso strutturale devono riportare obbligatoriamente la marcatura CE: questa certificazione accompagna sempre il prodotto in legno, dalla prime lavorazioni alla fase d'uso del prodotto.



05. Effetto di ritiro sulla planarità dei segati. Giachino, 2013

Una possibile classificazione degli elementi in legno può essere fatta in funzione dell'integrità delle fibre e quindi della conformazione del legno utilizzato, sulla base di quanto indicato dalla norma **UNI 3517:1957**[20]:

- travi: elementi che riprendono le dimensioni del fusto originale con un ridotto numero di operazioni di prima lavorazione. Rientrano in questa categoria il legno tondo[21], le travi Uso Trieste e le travi Uso Fiume[22]. Dopo il taglio del tronco e il suo decortecciamento, viene verificato il ritiro del legno e la possibilità di fessurazione lungo l'asse della trave affinché la capacità meccanica dell'elemento non sia compromessa da difetti intrinseci dell'albero. Le operazioni di squadratura del tronco producono altri materiali di scarto, che possono essere utilizzati per realizzare altri prodotti a base di legno o essere impiegati come combustibile;
- listelli, lamelle, morali, tavoli e legname squadrato: sono prodotti ottenuti dalla prima lavorazione del legno e possono avere sezioni con proporzioni rettangolari o quadrate, con spigoli vivi. In base alla posizione sulla sezione in cui avviene il taglio, si distinguono tre tipologie di elementi in legno: quelli a cuore vivo, quelli a cuore spaccato e quelli fuori cuore[23]. In funzione della direzione delle fibre del prodotto e quindi alla sezione del taglio,



06. Deposito di tronchi in quota, Pradalago (TN).

l'elemento in legno subirà uno specifico effetto di ritiro (fig. 04-05). La sezione ottimale per questo tipo di elementi è quella rettangolare, con un rapporto base/altezza=0,71 (Giachino, 2013, p. 80);

- piallacci: sono listelli sottili di legno, con spessore inferiore ai 4 mm e ottenuti per taglio o sfogliatura di altri sottoprodotti derivati dal primo taglio. I piallacci di legni pregiati, come noce o mogano, hanno spessori anche inferiori a 1 mm e vengono impiegati per rivestire altre specie legnose o prodotti meno pregiati, una pratica comune nel settore dell'arredo; i piallacci con spessori maggiori al millimetro possono essere tra loro assemblati con l'impiego di colle, ottenendo prodotti a base di legno con caratteristiche strutturali (tipo LVL) impiegati anche nel settore edile;
- scaglie e fibre in legno: sono scarti della prima lavorazione (tramite sfilacciatura o triturazione di parti meno nobili del tronco) e della seconda lavorazione e possono subire ulteriore sminuzzamento; le fibre possono avere lunghezze comprese tra 0,5 e 4 mm, mentre le scaglie possono avere dimensioni maggiori, sia in larghezza che lunghezza, ma con uno spessore inferiore ai 2 mm; le scaglie e le fibre possono essere incollate e pressate

per realizzare altri prodotti edilizi, quali pannelli isolanti o strutturali, oppure possono essere utilizzati come combustibile.

3.3 Le categorie d'impiego dei prodotti in legno

È possibile distinguere differenti destinazioni d'uso del prodotto in legno o a base di legno, in base al loro ruolo statico e ad altre eventuali funzioni che essi possono ricoprire; possono di conseguenza essere individuate specie di legno, lavorazioni e tipologie di prodotti adatte ai differenti impieghi. In questi termini, il legno può trovare uso come elemento isolante, di rivestimento (per interni o per esterni) o con ruolo strutturale ed è a quest'ultima categoria che sarà dedicata la successiva trattazione della tesi.

I **prodotti isolanti** più utilizzati sono costituiti da fibre e hanno densità variabile e quindi differenti prestazioni finali: nel settore edile vengono impiegati soprattutto nelle intercapedini delle chiusure e delle partizioni interne, sotto forma di pannelli oppure insufflati direttamente in opera. Oltre che per garantire un adeguato isolamento termico, il legno è ampiamente impiegato anche per l'isolamento acustico; ad esempio, i pannelli in fibre di legno mineralizzate legate con cemento sono ideali per ridurre fenomeni di riverbero (questo prodotto è stato utilizzato nell'auditorium Mainardi della sede dell'Università Ca' Foscari a Mestre, 2014).

Gli **elementi di rivestimento** possono essere realizzati con svariate specie, più o meno pregiate e anche combinate tra loro; determinante è la definizione del luogo in cui queste vengono installate, se internamente o esternamente, e l'esplicitazione delle funzioni che gli elementi in legno devono svolgere, ad esempio possono caratterizzare l'acustica di un edificio. In funzione del contesto in cui vengono applicati, i rivestimenti devono rispondere a specifici requisiti e quindi individuare forme, specie di legno e lavorazioni appropriate:

- rivestimento esterno: è diffuso l'impiego di doghe o listelli in legno massiccio, resistenti alle intemperie; il larice e l'abete sono tra le specie più utilizzate. Per la Casa Studio di Peter Zumthor (Zurigo, 1986) sono stati realizzati rivestimenti listelli di larice incalmati tra loro a formare elementi alti quanto tutta la parete e sorretti tramite collegamenti meccanici con la sottostruttura; questo rivestimento è stato realizzato senza trattamenti superficiali in quanto il progettista ha scelto di caratterizzare il proprio edificio anche grazie alle variazioni cromatiche che il legno subisce col passare del tempo (fig. 07);
- rivestimento interno: sono molto utilizzati pannelli a base di legno, lisci o lavorati, impiegati soprattutto per rivestire pareti e soffitti. I pannelli possono essere caratterizzati da lavorazioni geometriche che conferiscono proprietà fonoassorbenti. Possono essere modellati per ottenere specifici effetti di diffusione del suono, come nel caso dei pannelli in OSB realizzati per l'auditorium della Scuola di Musica di Lisbona (João Luís Carrilho da Graça, 2008), che compongono superfici concave e convesse. Il legno è impiegato anche per la realizzazione di rivestimenti interni soggetti a calpestio: sono generalmente utilizzate doghe in legno massiccio o in laminato. La doga in laminato consente di utilizzare specie pregiate solo sullo strato superiore di finitura, riducendone le quantità impiegate rispetto a una doga realizzata interamente con la stessa specie (ad esempio vengono impiegati rovere o faggio per elementi dalle finiture chiare e teak o iroko per i toni di colore più scuro).



07. Rivestimento esterno in listelli in larice dello Studio di Peter Zumthor, Haldenstein, Svizzera. Il legno a contatto con le intemperie e il cambio delle stagioni subisce un processo di lignificazione, con conseguente cambiamento cromatico: nel caso del larice il legno tende a diventare grigio. Shweta Gaadey

Gli **elementi strutturali** si distinguono in prodotti in legno massiccio (segati) e prodotti a base di legno. Con essi si realizzano:

- telai puntiformi, le cui travi e i pilastri possono essere in legno massiccio o in prodotti a base di legno (soprattutto lamellare e microlamellare), le parti possono essere giuntate con l'impiego di connettori in legno o in metallo, tipo piastre e viti. I telai puntiformi possono essere utilizzati per realizzare strutture multipiano;
- telai diffusi (tipo *balloon frame* e *platform frame*) sono realizzati con listelli o tavole in legno massiccio e collegati con chiodi o viti, talvolta vengono realizzati tamponamenti con pannelli a base di legno e aventi funzione collaborante, per irrigidire la struttura. Il telaio diffuso può essere impiegato per strutture di massimo tre piani di altezza;
- setti portanti: sistema costruttivo di più recente impiego, poiché dipende dall'impiego di pannelli a base di legno. Il prodotto più utilizzato per la realizzazione di edifici con questo sistema costruttivo è il pannello a tavole incrociate (X-Lam o CLT), la sua fortuna dipende dalla rapida installazione, possibile grazie alla prefabbricazione in officina e all'impiego di gru per muovere i pannelli in cantiere. Il sistema costruttivo in pannelli a base di legno e la sua evoluzione in termini di prestazioni meccaniche permette la realizzazione di strutture multipiano sempre più elevate[24].

Per la realizzazione degli elementi strutturali si impiegano soprattutto conifere: in Europa Centrale, come in Italia, è diffuso l'abete bianco e il larice, nel Nord Europa il pino. I prodotti a base di legno sono ottenuti da processi di ricomposizione della materia a partire da tavole o da fibre: questa categoria di prodotti è caratterizzata da prestazioni tecniche più elevate di quelle del legno massiccio e permette di ampliare le funzioni d'uso del legno nel campo edilizio perché è possibile controllare la produzione e la lavorazione degli elementi in funzione di requisiti determinati in fase progettuale[25]. L'impiego di elementi in metallo o colle, ha consentito di realizzare prodotti a base di legno più performanti, soprattutto in termini di resistenza meccanica: sono prodotti come il legno lamellare che nel corso degli anni hanno permesso di realizzare ampie coperture lignee[26], o come i pannelli prefabbricati per la realizzazione di edifici alti in legno.

3.4 Lo sviluppo dei prodotti a base legno

Se nell'Ottocento l'impiego di macchine utensili ha contribuito allo sviluppo della standardizzazione del legno, nel Novecento è la collaborazione con altri materiali come le colle, a rendere il legno un prodotto sempre più ingegnerizzato. Questo processo di ingegnerizzazione ha, in un certo modo, snaturato il valore del prodotto ligneo, la cui funzione e applicazione, fin dall'antichità, erano progettate a monte del processo di taglio e in relazione alla crescita dell'albero, a seconda delle condizioni climatiche e dell'inclinazione del fusto[27]. D'altro canto, il legno ingegnerizzato è frutto del lavoro dell'uomo e degli sviluppi della ricerca e della tecnica; il legno ingegnerizzato offre ai progettisti nuove opportunità di espressione e di definizione di forme e regole in funzione dello sviluppo della capacità di calcolo e di lavorazione della materia prima.

La categoria di prodotti a base di legno è molto variegata, tra tutti, vi è il legno lamellare, sviluppato in parallelo alle innovazioni nell'ambito della metallurgia. Con la ghisa prima e l'acciaio poi, sono stati realizzati sistemi di connettori (chiodi, perni, bulloni o anelli) per collegare più tavole lignee e realizzare un prodotto finale compatto, capace di sfruttare e combinare tra loro[28] le proprietà di ciascun elemento ligneo impiegato. Il successivo sviluppo e impiego di collanti (in sostituzione dei perni) ha permesso di realizzare prodotti ancora più performanti e dalle caratteristiche variabili in funzione della modalità in cui la colla viene impiegata (fig. 08); le lavorazioni e gli scopi di tali lavorazioni possono essere così riassunti:

- collegamenti puntuali tra le teste di elementi: viene effettuata una lavorazione detta a pettine che permette di aumentare la superficie di contatto tra gli elementi da collegare; questa lavorazione consente la realizzazione di pilastri e travi di grande lunghezza, con proprietà di elevata resistenza meccanica anche del giunto;
- collegamenti estesi tra tavole o piallacci sovrapposti: servono a produrre travi lamellari o pannelli, caratterizzati da un'elevata resistenza meccanica frutto della disposizione degli strati, le cui fibre possono seguire la stessa direzione tipo LVL - *Laminated Veneer Lumber*, oppure essere incrociate tipo X-Lam;
- miscele di fibre: servono a produrre pannelli e la gamma di tali prodotti disponibili sul mercato è molto ampia; alcuni si distinguono per le loro caratteristiche isolanti, altri possono essere impiegati come pannelli di rivestimento, di irrigidimento per telai o anche a fini strutturali.

L'introduzione sul mercato di prodotti ottenuti attraverso le lavorazioni appena descritte, ha comportato due importanti modifiche nella filiera produttiva del legno. In primo luogo la possibilità di utilizzare materiale ottenuto dallo scarto di lavorazione, come scaglie o materiali fibrosi, per produrre pannelli, oppure piallacci per realizzare prodotti stratificati come LVL - *Laminated Veneer Lumber*. In secondo luogo la possibilità di selezionare le parti di legno da utilizzare per il prodotto finale in relazione a specifiche esigenze, come migliorare le prestazioni meccaniche attraverso la selezione di elementi lignei privi di difetti, oppure conferire maggiore pregio al prodotto utilizzando sulle parti esposte tavole di specie come rovere, faggio, robinia o quercia (latifoglie).

I prodotti a base di legno ottenuti dall'unione mediante colle di **tavole**[29] o **piallacci**, si possono ordinare in cinque tipologie:

- il legno bilama o trilama, comunemente usato per la realizzazione di telai leggeri, è composto da due o tre lamelle (collegate longitudinalmente a pettine)

Prodotti a base di legno	Parallel Strand Lumber (PSL)	Laminated Veneer Lumber (LVL)	Glulam	Strucutal Insulating Panel (SIP)	X-Lam o CLT Cross Laminated Timber	Pannelli a tavole inchiodate
Elementi in legno utilizzati	Scaglie	Piallacci	Tavole	Scaglie	Tavole	Tavole
						
Applicazione	Elementi telaio strutturale	Elementi telaio strutturale	Elementi telaio strutturale	Pannello strutturale, orizzontale e verticale	Pannello strutturale, orizzontale e verticale	Pannello strutturale, orizzontale e verticale

08. Prodotti a base di legno più diffusi in Europa (fonte Ramage et al., 2017). La maggior parte dei prodotti sono ottenuti dall'incollaggio di diversi elementi in legno, sono più rari i casi in cui vengono utilizzati connettori come chiodi o graffe e quindi sistemi di assemblaggio a secco.

incollate tra loro, con fibre parallele e dimensione comprese tra i 140 e 240 mm in altezza, gli 80 e 200 mm in larghezza (Giachino, 2013, p. 86);

- il legno lamellare, ottenuto tramite l'incollaggio di lamelle e tavole con fibre parallele il cui spessore può essere al massimo di 45 mm (spessori inferiori ai 35 mm sono utilizzati per realizzare elementi curvi). Questo prodotto a base di legno è riconosciuto anche con il termine glulam, dall'inglese *glued laminated timber* e fa riferimento alla norma EN 14080:2013. Le dimensioni degli elementi così prodotti sono variabili in relazione al numero di strati di lamelle, al loro spessore e alla specie utilizzata; generalmente la larghezza del prodotto finale è compresa tra i 60 e i 240 mm, l'altezza può superare il metro e la lunghezza può raggiungere i 30m;
- i pannelli a tavole incrociate, comunemente detti X-Lam[30], vengono impiegati per realizzare strutture a setti portanti. Questa tecnologia è stata introdotta sul mercato negli anni Novanta e per anni l'Austria ha detenuto nel proprio territorio le più importanti aziende produttrici in questo settore[31]. La produzione di pannelli X-Lam è complessa, richiede macchinari specifici e processi molto controllati (fig. 09);
- il legno microlamellare, noto come LVL - *Laminated Veneer Lumber*, è realizzato attraverso la sovrapposizione di sottili piallaci, disposti con fibre parallele, incollati e pressati l'uno con l'altro. È una tipologia di prodotto che non ha ancora trovato sviluppo nel contesto aziendale italiano, e ciò ne ha determinato uno scarso impiego nonostante i comportamenti meccanici siano migliori rispetto al più conosciuto legno lamellare[32]. Il LVL è un prodotto altamente complesso da produrre e richiede una quantità maggiore di colla, poiché gli strati dei piallacci impiegati sono inferiori ai 4 mm;
- il compensato strutturale, realizzato sovrapponendo piallacci i cui strati sono disposti ortogonalmente l'uno con l'altro; il compensato strutturale è costoso da produrre e trova scarsa applicazione in ambito edilizio. In tal caso quello più diffuso è il compensato marino[33], sviluppato nel settore nautico e impiegato anche come pannello strutturale.

I prodotti a base di **fibre** di legno unite mediante colle[34] sono generalmente meno resistenti dal punto di vista meccanico rispetto a quelli prodotti impiegando strati di tavole o piallacci di legno: la parte di legno contenuta nel



09. Produzione dei pannelli X-Lam: applicazione della colla poliuretanica per la disposizione dello strato successivo di tavole in lengo, con orditura ortogonale rispetto lo strato sottostante. Davide Maria Giachino

prodotto finale è scomposta in numerose particelle, private delle proprietà che caratterizzano le fibre del legno. In questo modo si possono comunque realizzare pannelli resistenti alle sollecitazioni meccaniche, soprattutto per irrigidire e controventare i telai in legno. In funzione delle dimensioni delle fibre, i prodotti possono essere classificati nelle seguenti categorie (CNR 2018/4.3.2.2.3 - Pannelli a base di legno; UNI EN 14915:2017):

- compensato (UNI EN 636:2015), pannello ottenuto dalla stratificazione di più piallacci;
- pannelli di scaglie orientate (UNI EN 300:2006); conosciuto anche come OSB - *Oriented Strand Board*, si tratta di un pannello a scaglie di legno, le cui fibre sono disposte su piani paralleli, tra loro incollate e pressate;
- pannello di particelle (truciolati) UNI EN 312:2010;
- pannelli di fibre, UNI EN 622-1:2004, che si distinguono in base all'umidità contenuta nelle fibre in legno: pannelli per via umida (fibre con umidità superiore al 20%) sono i pannelli ad alta densità, HB - *Hard Board* (densità media compresa tra 900-1000 kg/mc, con spessori dai 3 ai 9 mm); pannelli per via secca (fibre con umidità inferiore o uguale al 20%) sono invece pannelli con bassa e media densità, MDF - *Medium Density Fibreboard* (la cui densità è compresa tra i 450-850 kg/mc).

Realizzare prodotti a base di fibre o di scaglie richiede un elevato dispendio energetico, sia nella lavorazione della materia prima perché i processi di triturazione e di pressione avvengono ad alte temperature, che nella fase di smaltimento in quanto la combinazione del legno con materiali leganti rende difficile lo smaltimento del prodotto a fine vita. Tale problematica emerge chiaramente nelle valutazioni di impatto ambientale, che possono diventare un fattore determinante nella selezione dei prodotti da costruzione. I prodotti a base di legno e colle oltre a riportare la certificazione CE, obbligatoria per il commercio e l'utilizzo dei prodotti lignei, sono spesso accompagnati dalla certificazione volontaria *Environmental Product Declaration* (EPD)[35], utile a descrivere i parametri ambientali più significativi del prodotto e a caratterizzare il suo impatto nelle varie fasi del ciclo di vita in riferimento alle norme della serie ISO 14040 (Giachino, 2013, p. 89).

I **collanti** sono uno dei principali fattori di innovazione nel settore della lavorazione del legno più recente. A partire dal XX secolo colle e collanti hanno contribuito a realizzare prodotti innovativi per costruire strutture altrettanto innovative, sia dal punto di vista morfologico per complessità di elementi e collegamenti, che in altezza: si pensi che il Treet di Bergen in Norvegia (ARTEC-AS, 2016), realizzato con un sistema costruttivo misto composto da elementi piani tipo X-Lam e lineari in lamellare, tocca quota 49 m, un'altezza che difficilmente si può raggiungere esclusivamente con l'impiego di legno massiccio.

La colla per il legno è stata introdotta sul mercato dal falegname tedesco Karl Friedrich Otto Hetzer (1846-1911) che brevettò anche differenti tecnologie per realizzare prodotti in legno a partire da elementi più piccoli; egli brevettò anche un sistema per realizzare elementi curvi[36], sempre a partire da piccoli elementi il legno. Fino ai primi anni XX secolo la colla più diffusa era la casaeina, un legante di origine animale la cui produzione era laboriosa e costosa (Jeska, Pascha, 2015, p. 38), successivamente si produssero le resine sintetiche, più economiche e comunque adatte anche all'impiego strutturale[37]. La tecnologia si è evoluta al punto tale che oggi i prodotti a base di legno presentano prestazioni di resistenza o durabilità superiori anche dell'80% rispetto al legno naturale perché l'incollaggio conferisce un elevato grado di omogeneità al prodotto finale (Jeska, Pascha, 2015, p. 41).

Nel riconoscere i prodotti di questo tipo (legni ricomposti, miscele legno-polimero, ecc.) è possibile chiedersi fino a che punto si stiano osservando prodotti di legno, quale sia il confine tra materiale naturale e materiale artificiale e quali siano le ricadute dal punto di vista della sostenibilità ambientale: nella prospettiva dei prodotti naturartificiali (Tatano, 2006), il suddetto confine è infatti meno distinto e la sostenibilità, affidata alla naturalità di un prodotto, si declina invece al proprio impatto con l'ambiente e al suo ritorno a materia o risorsa nuova, per mano della natura o della tecnica umana. Lo sviluppo delle tecnologie della produzione dei materiali a base legno ha permesso di ottenere prodotti con caratteristiche paragonabili a quelle degli elementi plastici[38], con l'indubbio beneficio di ottimizzare la quantità di materia impiegata ma portando alla perdita delle caratteristiche originali del legno massiccio (igrometria, anisotropia legata alle fibre, ecc.). Con l'introduzione di nuovi strumenti per la lavorazione (dalle macchine CNC ai contemporanei robot) la tendenza che sviluppa materiali a base legno dalle alte prestazioni si è rafforzata in quanto tali prodotti non sono limitati dalle proprietà naturali del materiale, in termini di forma e di irregolarità ad esempio; inoltre i prodotti a base di legno possono essere più facilmente plasmati e lavorati, perché la materia è più omogenea.

Ciò consente di ridefinire le forme e le tensioni a cui possono essere sottoposti i vari elementi costruttivi che compongono un edificio, giungendo ad introdurre anche nuovi linguaggi strutturali, come nel caso di Shigeru Ban che ha progettato il giunto degli elementi del telaio in legno del Tamedia Centre di Zurigo (2011) o di Yves Weinend che ha sviluppato un collegamento legno-legno tra elementi piani portanti nel Teatro Vidy a Losanna (2017).

3.5 Gli strumenti per la lavorazione del legno

L'evoluzione della carpenteria lignea segue e spinge al contempo l'innovazione tecnologica che caratterizza gli strumenti da lavoro e l'organizzazione del lavoro stesso.

Strumento	Impiego	Meccanizzazione
Pialla	Lisciare superfice di un elemento	Piallatrice
Sega	Tagliare il legno in qualsiasi direzione	Sega a nastro (officina) Sega circolare Motosega (taglio del tronco)
Ascia È una lama immanicata con uno o due bordi taglienti	Fendere e squadrare	Sega a nastro
Scure È una lama immanicata con uno o due bordi taglienti	Abbattere, spaccare, squadrare, scortecciare	Sega a nastro
Accetta È una lama immanicata con uno o due bordi taglienti (come la scure, ma usata con una mano)	Spaccare elementi in legno di piccole dimensioni	Sega a nastro
Tornio	Lavorazioni intorno all'asse di un elemento, come la filettatura o la cilindratura. Nel processo di tornitura l'elemento si muove e l'utensile resta fermo; nella fresatura l'elemento è fermo e l'utensile si muove per effettuare lo stesso tipo di lavorazione	Fresatrice Macchina con utensile rotativo intercambiabile per spianare superfici, effettuare modanature, tagliare anche sagome complesse
Trapano ad archetto	Strumento costituito da un archetto, un fuso, una punta collegati da una funicella che trasferiva la forza impressa dall'uomo alla punta, consentendole di ruotare e forare	Fresatrice

10. Gli utensili e la meccanizzazione del gesto lavorativo. Molte macchine utensili vengono utilizzate nelle falegnamerie e nelle carpenterie: l'automazione stra contribuendo ad integrare tutti questi processi in una macchina, controllata digitalmente (CNC).

La meccanizzazione ha trasformato il mestiere artigianale, trasferendo operazioni prettamente manuali a strumenti che potevano riprodurne il gesto sfruttando fonti energetiche diverse, come l'acqua o, successivamente, il vapore (fig. 10). Allo stesso modo la digitalizzazione ha contribuito nell'ultimo secolo a ridefinire il processo di lavoro, con l'impiego dell'automazione e di strumenti sempre più capaci di lavorare autonomamente. Accanto alla meccanizzazione e alla digitalizzazione degli strumenti da lavoro, la stessa figura professionale e il suo ruolo all'interno del processo si è trasformata, così come il termine stesso "carpentiere", sebbene non sia ancora chiara la sua origine. La sua etimologia riconduce al latino *carpentarius*, costruttore di carri, che a sua volta deriva da *carpentus*, una tipologia di carro gallico a due ruote e coperto (AA. VV, 2004, p. 192). La carpenteria tuttavia si riferisce a "un insieme di tecniche e attività di montaggio nelle costruzioni, specialmente nei cantieri edili e navali" (De Mauro, 2004, p. 209), quindi a una tecnologia molto più ampia e riferita soprattutto alla capacità di realizzare strutture sia in legno che in metallo, per questo motivo occorre sempre specificare il tipo di carpenteria (lignea o metallica). Oggi la carpenteria è un'insieme di attività che fa riferimento ad un campo specifico, quello strutturale, ma in passato e per molto tempo questo termine ha coinciso con le attività di competenza del capo mastro, e quindi anche dell'architetto capace di coordinare l'intero processo costruttivo (Killer, 1985, p. 112; Kieran e Timberlake, 2004, p. 97). In epoca Romana questa figura veniva indicata come *faber tignarius*, differente dal *faber intestinarius* che corrisponde alla figura dell'ebanista contemporaneo[39], questa distinzione offre quindi una prima distinzione tra le figure odierne del carpentiere (*carpenter*) e del falegname (*joiner*). La carpenteria si riferisce esclusivamente alla componente strutturale di un sistema, mentre la falegnameria riguarda la produzione di serramenti, mobili e altri prodotti a base di legno, anche estranei al contesto edilizio, come ad esempio i giocattoli[40].

Le specializzazioni dei mestieri hanno attribuito, nel corso della storia, anche i nomi agli utensili che sono stati creati dagli stessi artigiani per riprodurre o



11. Le macchine per carpenteria e falegnameria Hundegger sono tra le più diffuse. L'azienda è stata fondata da Hans Hundegger nel 1978, che da anni contribuiva a realizzare macchine per ottimizzare le lavorazioni nella segheria di famiglia. Nel 1985 mise in commercio la prima macchina automatica per il taglio del legno. I prodotti Hundegger si riconoscono anche dalla scelta cromatica: giallo con bordature rosse la cabina di lavorazione, azzurro i nastri e i piani di appoggio (in foto il modello Troncatrice Automatica TURBO-Drive). Hundegger

sviluppare i gesti delle lavorazioni: si pensi ad esempio al coltello da scandola, la cui conformazione è appropriata alla produzione dell'elemento della scandola, una tavola larga non più di 30 cm utile a formare il manto di copertura degli edifici. Gli utensili per la lavorazione del legno sono molto vari e questa varietà è dovuta non solo al tipo di lavorazione da effettuare, ma anche dalla fisionomia dell'utilizzatore, che può personalizzare la morfologia degli strumenti al fine di utilizzarli più agevolmente (ad esempio, la dimensione di un manico per l'impugnatura). Benché la varietà degli strumenti sia molto ampia, dal Medioevo all'epoca moderna gli utensili sono restati pressoché invariati e hanno subito solo lievi trasformazioni, mantenendo inalterate le principali funzionalità e le caratteristiche tecniche (Zanini, 2018, p. 12).

L'evoluzione dell'utensile va considerata anche in relazione allo spazio che uno strumento necessita e all'interazione che l'utilizzatore ha con esso: si pensi ad esempio ad una panca, ad una moderna macchina CNC o, più semplicemente, alla sega che è lo strumento più utilizzato nel settore del legno (Zwerger, 2015, p. 72) e che è stato in fasi successive meccanizzato e poi automatizzato. La sega, fin dalle sue origini che risalgono a circa 4000 anni fa, era un utensile utile a tagliare il legno. La sega era mossa dal proprio corpo al fine di utilizzare quanta più energia possibile: esistevano differenti tipologie di seghe in funzione delle operazioni da eseguire, come ad esempio la sega a due manici, cioè una lama alle cui estremità erano disposti due manici che due differenti carpentieri impugnavano, utilizzata soprattutto per il taglio di grandi elementi. La meccanizzazione del processo di segagione, attraverso lo sfruttamento di corsi d'acqua, ha permesso di utilizzare altre fonti energetiche diverse da quelle umane e di affidare al carpentiere solamente lo spostamento degli elementi in legno prima e dopo il taglio all'interno della macchina. Anche la piallatura, lavorazione attraverso la quale la superficie lignea viene lisciata tramite l'impiego di una pialla, venne in poco tempo meccanizzata e utilizzata soprattutto per piallare i semilavorati in legno (tavole, profili, travi) il cui numero cresceva proprio grazie alla meccanizzazione

Codici doganali - classificazione NC	
8465.10.10	Macchine a più operazioni differenti con ripresa manuale del pezzo per ogni operazione (combinate)
8465.10.90	Macchine a più operazioni differenti senza ripresa manuale del pezzo per ogni operazione (ad operazioni multiple)
8465.20.00	Centri di lavorazione del legno, del sughero, dell'osso, della gomma indurita, delle materie plastiche dure o di materie dure simili, che possono eseguire diversi tipi di operazioni con cambiamento di utensili automatici da un magazzino o simile, in conformità con un programma di lavorazione
8465.91.00	Segatrici di ogni tipo
8465.92.00	Macchine per spianare, piallare, fresare
8465.93.00	Macchine per pomiciare, smerigliare o lucidare
8465.94.00	Macchine per curvare, montare, comprese le presse
8465.95.00	Foratrici, mortasatrici
8465.96.00	Macchine per spaccare, tagliare, tranciare o svolgere
8465.99	Altre: macchine per il condizionamento del legno, macchine ed apparecchiature ausiliarie
8479.30	Presse per la produzione di pannelli truciolari ed MDF / altre
8466.92	Parti e pezzi staccati di macchine fisse (ricambi) relative alla voce 8465

delle segherie: "La sempre più facile reperibilità di legno segato, in forma di assi, ha indubbiamente modificato il modo di concepire le varie fasi di lavoro, finendo per estendere il campo di utilizzo delle pialle e ridimensionare quello delle asce, che vennero soppiantate per molte operazioni" (Zanini, 2018, p. 18).

Strumenti come asce, scuri e accette, vengono gradualmente abbandonate, poiché le operazioni di taglio sono sempre più spesso eseguite dalle macchine utensili (fig. 11): questa trasformazione comporta cambiamenti in tutti gli altri strumenti d'ausilio per la lavorazione, come gli elementi di fissaggio o utili al sostegno dei componenti in legno durante le fasi di lavorazione[41].

Il tornio e la fresatrice sono macchine utensili che permettono di effettuare lavorazioni molto simili, ma con procedure differenti: il tornio lavora sfruttando la rotazione dell'elemento in legno attorno ad un proprio asse, mentre nella fresatrice il legno resta bloccato ed è l'utensile a ruotare attorno ad un asse per effettuare delle lavorazioni superficiali sull'elemento, la sgrossatura per sgrezzare il prodotto e la finitura per lavorazioni più precise. I primi torni risalgono al 1700 e le fresatrici possono essere considerate una loro evoluzione: la prima macchina utensile fresatrice risale al 1814 ed è presente negli arsenali di Harpes Ferry e Springfield negli Stati Uniti (Marchis, 1994). Nel corso di un secolo la macchina acquisisce continui miglioramenti in termini di misurazioni e di precisione nella lavorazione, fino alla fresatrice Cincinnati Hydro-Tel brevettata negli anni '30 del Novecento, molto simile a quelle odierne come struttura, ma senza componente digitale: occorrono ancora alcuni decenni prima di poter integrare più operazioni all'interno della stessa macchina. A partire dal 1980 entrano sul mercato le prime macchine a controllo numerico (CNC) per il legno, grazie all'impiego di sistemi digitali CAM (*Computer Aided Manufacturing*) che consentono di programmare direttamente le operazioni di una macchina.

La prima configurazione di programmi CAM con macchine CNC per la lavorazione del legno risale al 1984, quando la compagnia Burmek[42] mise in commercio la macchina SPL270-1. Successivamente, sarà la compagnia tedesca Hundegger a sviluppare altre macchine CNC per il legno[43] (Jesca, Pascha, 2015, p. 60). A seconda delle lavorazioni da eseguire, le macchine utensili hanno contribuito

12. La nomenclatura combinata (NC) costituisce la base per la dichiarazione delle merci all'importazione o all'esportazione nonché ai fini statistici per il commercio all'interno dell'Unione Europea (Intrastat), definendo la Voce Doganale delle merci. La NC serve a determinare inoltre l'aliquota del dazio doganale. La nomenclatura combinata è stata istituita con il regolamento (CEE) n 2658/87 del Consiglio relativo alla nomenclatura tariffaria e statistica ed alla tariffa doganale comune. Viene aggiornata ogni anno e viene pubblicata come regolamento di esecuzione della Commissione nella Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, serie L. Questa versione è quella riferita al Regolamento (UE) n. 1821/2016 nella Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 294 del 28 ottobre 2016.

BLUMER-LEHMANN AG

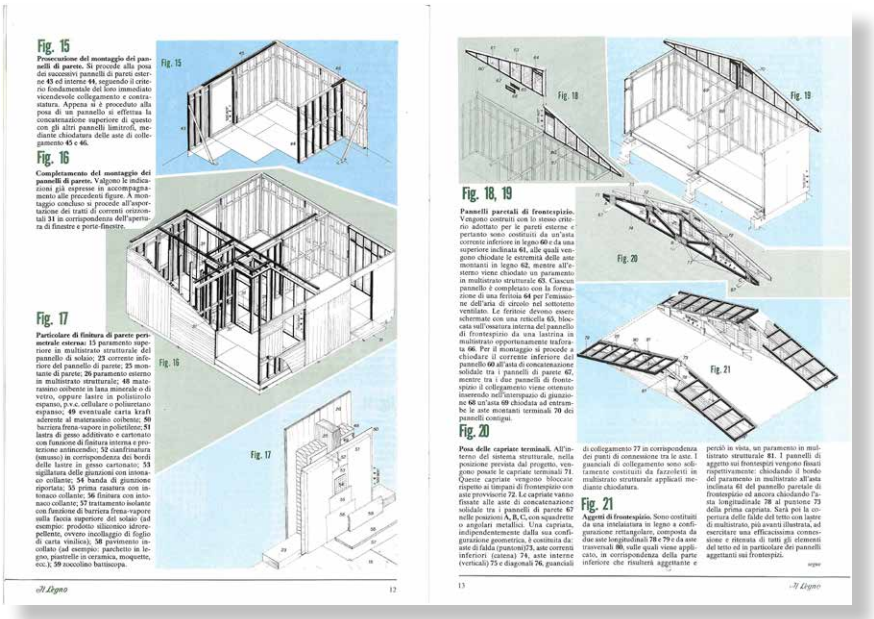
Il gruppo Blumer-Lehmann AG rappresenta una delle carpenterie più conosciute in Europa, grazie anche alle collaborazioni con architetti di fama internazionale come Shigeru Ban e Norman Foster.
Il gruppo nasce dall'antica segheria di Sägerei Leonhard Lehmann, fondata nel 1875. Nel 1935 l'azienda si amplia con un laboratorio di falegnameria e nel 1986 la società si divide in Lehmann Arnegg e Lehmann Gossau. Nel frattempo nel 1980, l'ingegnere Blumer Hermann realizza il Blumer System Truss, un sistema costruttivo in legno per coperture: tale produzione è supportata dall'impiego di una macchina CNC a 5 assi, il cui prototipo è dell'azienda Krüsi. La macchina viene acquistata dalla Blumer-Lehmann AG e prodotta con il nome di CNC Lignamatic.
Nel 1999 Lehmann Gossau e Blumer Elementtechnik AG Waldstatt si fondono, dando vita alla Blumer-Lehmann AG. Negli anni seguenti la compagnia è cresciuta e si è specializzata nell'intera filiera del legno:
- Blumer-Lehmann AG, per le costruzioni in legno, suddivisa in costruzione modulare, costruzione forme libere, appaltatore generale;
- Blumer-Lehmann Silobau AG, per la costruzione di silos;
- Lehmann Holzwerk AG, per la prima lavorazione del legno;
- Lehmann Pallets AG, per la produzione di pallets.

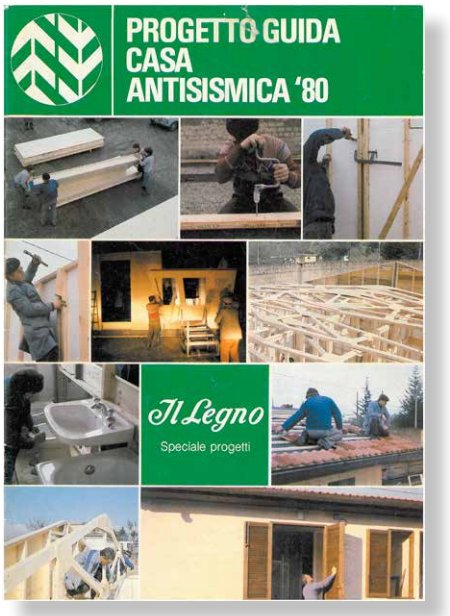
in maniera differente: mentre nella fase di prima lavorazione hanno permesso di ridurre i tempi di taglio di lamelle, tavole o piallacci, nella fase di seconda lavorazione hanno contribuito a realizzare operazioni molto precise, anche al fine di predisporre elementi di collegamento in metallo (piastre e bulloni) (fig. 12).

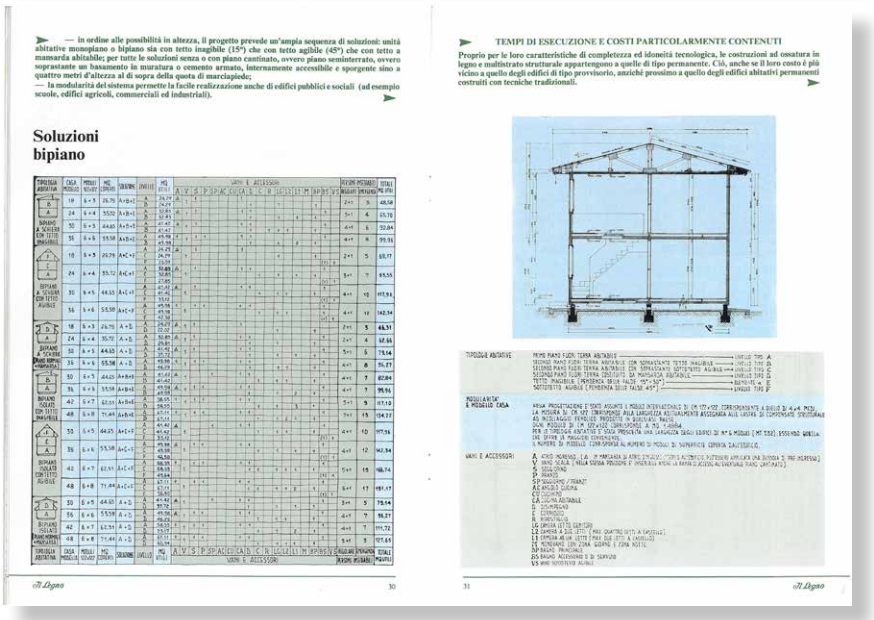
I primi risultati di questa innovazione sono stati le coperture realizzate per le grandi strutture: edifici di culto e di intrattenimento (per la musica, le esposizioni e lo sport[44]), cioè luoghi in cui lo spazio coperto ha bisogno di essere libero da strutture di elevazione verticale e le grandi coperture in legno lamellare, prodotti che proprio negli anni Novanta conoscono un'ampia diffusione sul mercato, sfruttano le strutture perimetrali. Si tratta di telai che impiegano elementi semplici come travi a sezione costante oppure ad arco, o di telai che sfruttano sistemi più articolati come travi reticolari o capriate, fino a strutture geodetiche più complesse o sistemi a cassettonato.

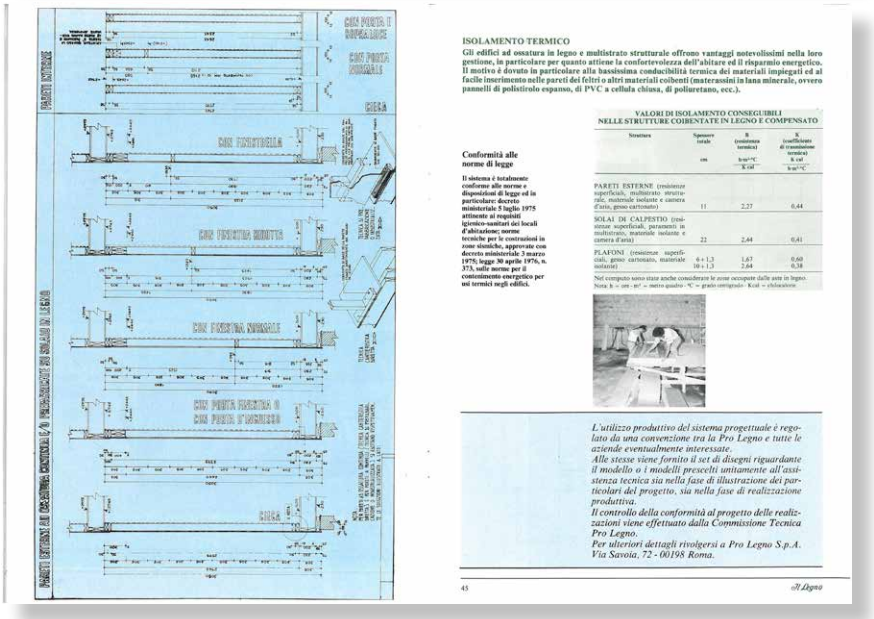
Vista la complessità e i tempi lunghi richiesti per la realizzazione delle strutture e dei giunti dei sistemi appena descritti, durante la prima fase dell'impiego dei processi di interfaccia CAD/CAM integrati alle macchine CNC si definirono alcune soluzioni standardizzate per realizzare i giunti, riducendo drasticamente i tempi di produzione dei componenti lignei. Hermann Blumer riconobbe la potenzialità di questo processo (Jesca, Pascha, 2015, p. 61) e tradusse i vantaggi della produzione digitale in un mercato in grado di offrire rapidamente soluzioni per la carpenteria lignea, in un primo momento standardizzate[45] e successivamente customizzate. Nel 1999 la fusione dell'azienda di Blumer (Blumer Elementtechnik AG Waldstatt) con Lehmann Holzbau Gossau, ha dato forma a una delle aziende internazionali più all'avanguardia nella produzione della carpenteria lignea, conosciuta oggi con il nome di Blumer-Lehmann AG (Gossau, Svizzera). La macchina CNC viene indicata anche con il nome di centro di lavoro, perché è uno strumento capace di svolgere più tipologie di lavorazione in autonomia e quindi rappresenta effettivamente un luogo in cui il prodotto subisce, in un unico processo, più operazioni di lavorazione (come ad esempio la fresatura e la piallatura) attraverso un cambio utensile che avviene automaticamente in funzione dei comandi impostati.

La meccanizzazione delle lavorazioni del legno ha trovato sviluppo anche in Italia, come testimonia la nascita di Acimall (Associazione costruttori italiani di macchine e accessori per la lavorazione del legno) che dal 1966 raccoglie le aziende del settore e promuove la ricerca tecnologica in questo settore. L'Associazione oggi raccoglie 156 aziende e cura la più importante fiera internazionale del settore, che si svolge ogni due anni a Milano: XYLexpo. La meccanizzazione nel territorio italiano si sviluppa soprattutto nel comparto della falegnameria, per la produzione di serramenti e di mobili[46]. Nel settore della carpenteria lignea i tempi sono stati più lunghi, soprattutto per questioni socio economiche che hanno promosso l'impiego di altri materiali da costruzione differenti dal legno; la ricerca in questo ambito tuttavia ha continuato a progredire, anche attraverso la promozione di particolari sistemi costruttivi come i telai leggeri in legno, ancora poco conosciuti in Italia, ma già ampiamente diffusi in aree come il Nord Europa o il Giappone. Negli anni Sessanta l'azienda lombarda Cenci ha promosso l'impiego del sistema *platform frame*[47] ligneo, corrispondente al *telaio diffuso*, come sistema rapido e flessibile (Cenci, 2013), adatto anche a contesti geografici soggetti a eventi sismici. Cenci promuove l'impiego di questo sistema sfruttando le potenzialità dell'industria dell'epoca, che poteva produrre elementi standardizzati e pronti per essere installati in tempi rapidi. Nonostante le attività di formazione promosse, le pubblicazioni sul tema e le iniziative di









13. Negli anni Settanta lo studio tecnico Cenci Otsuka (di Giovanni Cenci e Tatako Otsuka) dedica la propria attività allo sviluppo del sistema costruttivo platform frame con elementi in legno, facendo riferimento alle normative europee di quegli anni (DIN 1052 e British Standard CP 112). Il sistema costruttivo riprende le pratiche utilizzate nei contesti nord europei, nord americani e giapponesi e viene promosso dallo studio Cenci Otsuka come modello costruttivo antisismico.

Il 20 luglio 1980 viene pubblicato "Progetto guida. Casa antisismica '80" come supplemento al numero 14 della rivista "IL legno" (PRO Legno Spa, Roma), di cui si riporta la copertina e alcune pagine interne. Il documento descrive nel dettaglio il modello abitativo platform frame, con una prima parte dedicata alla descrizione generale del sistema e alcuni esempi, e una seconda parte dedicata invece all'esecuzione e ai dettagli, degli elementi strutturali, del collegamento con infissi, della disposizione corretta dei materiali di rivestimento e per l'isolamento termico e acustico. Sono riportate tabelle con indicazioni sui modelli abitativi, realizzati attraverso la combinazione di moduli standard: tale combinazione è rivolta alla costruzione di abitazioni monopiano o bipiano, a schiera o isolate, con tetto agibile o meno. Obiettivo dello studio Cenci Otsuka è quello di promuovere questa sistema costruttivo già diffuso in altri Paesi (Nord Europa, USA, Canada, Giappone, Australia) anche nel contesto italiano, per la sua flessibilità di progettazione attraverso la combinazione di moduli, per il comportamento al sisma, per il sistema di prefabbricazione utile a ottimizzare le fasi di cantiere. Nel corso degli anni sono stati organizzati corsi didattici e visite in cantiere: il corso Pronto Casa a Lipomo (Como, 1977, 1978); la sede della Foresteria Triestina allo scalo legnami di Trieste (1978); il prototipo delle abitazioni temporanee per i terremotati dell'Irpinia (1980); il progetto guida Casa Antisismica '80 della Prolegno, realizzato dalla Domenico Russo e figli s.p.a. di Benevento (1980); la "baracca" per i dirigenti ACSM, costruita con l'impiego di macchine CNC Hundegger (2003).

promozione legate alle attività di cantiere (fig. 13), il sistema a telaio diffuso non ha avuto successo nel contesto italiano, che proprio in quegli anni stava attendendo le prime norme sulle costruzioni[48] e che non affronteranno l'uso del legno per molti decenni. I sistemi a telaio diffuso in legno sono impiegati per realizzare costruzioni in zone sismiche, la loro efficienza è dimostrata dalle ricerche scientifiche, dalle prove in laboratorio e anche dalla storia degli eventi, come il terremoto che ha colpito Christchurch in Nuova Zelanda nel 2011 e che testimonia come gli edifici realizzati con sistema *platform frame* resistano a questa tipologia di eventi (Buchanan *et al*., 2011).

3.6 Le macchine CNC e i robot

La meccanizzazione degli strumenti da lavoro, se da un lato ha ottimizzato i processi di lavorazione in termini di tempo ed energia, dall'altro ha contribuito a semplificare le tipologie di giunti, favorendo allo stesso tempo l'impiego di connettori metallici[49] (Jeska, Pascha, 2015). Ma la crescente evoluzione delle macchine corrisponde a un grado sempre maggiore di precisione e a un'interfaccia con l'operatore sempre più semplificata e immediata: la programmazione delle macchine CNC avviene attraverso il codice ISO (in riferimento al codice ISO 6983 che definisce il linguaggio informatico da utilizzare per le operazioni standard, come ad esempio la direzione o la velocità), prima direttamente sul macchinario, successivamente attraverso i programmi CAM. La precisione e l'agile programmazione permettono al carpenterie di organizzare lo strumento, come una macchina CNC o un braccio robotico, in funzione delle lavorazioni da seguire, contribuendo ad accrescere il grado di personalizzazione.

A partire dagli anni 2000 iniziano ad essere diffusi sul mercato macchinari CNC in grado di muoversi su più di 3 assi (X, Y, Z): aumentare la libertà di movimento dell'utensile di lavorazione significa ampliare il numero di possibili operazioni che questo può compiere, che combinati con sensori sempre più performanti, accrescono l'autonomia della macchina. L'impiego di macchinari CNC a più assi[50] offre la possibilità di realizzare elementi curvi e, allo stesso tempo, di monitorare la precisione della lavorazione attraverso il controllo digitale.

Il crescente numero di gradi di libertà rende lo spettro delle lavorazioni di una macchina CNC sempre più ampio e simile a quello di un braccio robotico: si può sostenere che non sia più necessario distinguere le due tipologie di strumenti poiché i prodotti che si possono ottenere sono simili[51]. Questa analogia si può riconoscere in termini di prodotto finale, ma l'interazione tra uomo e macchina durante la fase produttiva è differente e varia a seconda che si utilizzi un braccio robotico o una macchina CNC.

Si possono individuare due aspetti principali che distinguono l'interazione tra l'uomo e queste tipologie di macchine:

- la programmazione: il robot è uno strumento complesso da programmare e il personale addetto deve essere quindi specializzato e aggiornato nel merito dei programmi che vengono spesso sviluppati *ad hoc* per alcuni tipi di robot; la macchina CNC, invece, dispone di interfacce più semplici e intuitive, capaci di tradurre immediatamente il progetto digitale CAD in comandi di produzione;
- lo spazio d'uso: la macchina CNC si muove su binari installati su un piano e la dimensione del piano talvolta impedisce al lavoratore di avvicinarsi al



14. Esempio di centro di taglio dell'azienda SCM esposto durante la fiera XYLexpo 2018 a Milano. La macchina CNC esegue la lavorazione in uno spazio completamente protetto, in cui l'uomo può intervenire solo tramite comandi digitali e non attraverso un'interazione diretta con lo strumento di lavoro: il cavalletto, al cui interno sono installati uno o più mandrini per la lavorazione, il magazzino utensili e i sensori, si muove sui binari installati lungo il nastro sul quale è fissato l'elemento da lavorare.

prodotto in fase di lavorazione; il robot invece, trattandosi di un braccio autonomo e libero, è in grado di lavorare su un prodotto non necessariamente disposto su un piano delimitato e ciò elimina l'ostacolo fisico che il piano di lavoro rappresenta nei confronti degli operatori e che è presente nel caso della macchina CNC.

Il livello di precisione nella lavorazione (ciò vale per entrambi i tipi di macchine) diviene sempre più alto grazie all'impiego di laser per la rilevazione della superficie di lavoro e per la lettura del comportamento e delle movimentazioni degli utensili integrati nelle macchine: la lettura dei dati relativi alla progressione del lavoro e l'elaborazione delle informazioni sono operazioni che le CNC e i robot possono svolgere in modo continuo, anche registrando e reagendo autonomamente alle variazioni che può subire il progetto sviluppato in modo parametrico, in funzione della risposta del materiale sottoposto a lavorazione[52] e in relazione alle eventuali variazioni di progetto che possono verificarsi in corso d'opera.

L'automazione, attraverso le macchine CNC e i bracci robotici, è impiegata per la carpenteria lignea ed è applicata e sviluppata soprattutto nel settore dei pannelli strutturali, un sistema costruttivo sempre più diffuso in quanto consente di gestire il cantiere in maniera ottimale, riducendo l'impiego di risorse ed energia *in situ* (Ramage *et al*, 2015, p. 345). La crescita del mercato dei sistemi costruttivi a pannelli è confermata anche dalle tipologie di macchinari per la lavorazione del legno oggi disponibili (Acimall, 2018): in occasione della fiera XYLexpo 2018, gli strumenti esposti erano macchinari di dimensioni che si attestavano mediamente attorno ai 35 mc, centri di lavoro altamente performanti e capaci di svolgere più lavorazioni simultaneamente (fig. 14) anche grazie alla collaborazione di più mandrini e alla possibilità di spostare gli elementi in funzione delle operazioni da eseguire (quindi l'elemento non è più necessariamente fermo). Le aziende presenti alla fiera, leggendo le tendenze del mercato in cui operano, sostengono che la costruzione a pannelli rappresenterà il futuro delle costruzioni in legno ancora per molti anni. Tuttavia le macchine in commercio sono per la maggior parte progettate per effettuare operazioni specifiche e per produrre un medesimo prodotto in grandi quantità; le innovazioni future del mercato consentiranno l'impiego di tecnologie



15. Shaper Origin è il primo modello dell'azienda Shaper Tools di CNC portatile, guidata dall'operatore. Una volta inviato il modello di taglio alla macchina, questa ricostruisce sullo spazio georeferenziato il disegno, attraverso l'impiego di appositi indicatori, evitando quindi la realizzazione di dime o sagome per il taglio. L'operatore seguendo le indicazioni sul display, guida il mandrino lungo il tracciato.

che già sono state sviluppate in merito alla produzione e l'utilizzo di strumenti flessibili, in grado di adeguarsi alle mutevoli esigenze dell'utenza, sfruttando le potenzialità dell'automazione per realizzare prodotti su misura e personalizzabili in funzione allo specifico progetto. Mentre il mercato si orienta in via quasi esclusiva verso il sistema costruttivo a pannelli, vengono ignorate quasi del tutto le possibilità legate all'uso del legno massiccio o lamellare ad esempio per la realizzazione di telai.

Uno strumento recentemente introdotto sul mercato è Shaper Origin, la prima macchina CNC portatile (fig. 15): si tratta di uno strumento mosso manualmente sulla superficie da lavorare, è dotato di un mandrino per l'utensile e di un display che fornisce la traccia da seguire per effettuare la lavorazione, come da progetto digitale. Questo strumento è in commercio dal 2016 ed è impiegato soprattutto nelle lavorazioni da falegnameria ma può trovare utilizzo anche nel settore della carpenteria lignea, lavorando ad esempio sulla sagoma dei giunti. È uno strumento non ancora diffuso nelle aziende o nelle botteghe professionali, ma nel campo della ricerca scientifica sta già riscuotendo successo, come dimostra il recente convegno ROBARCH 2018 svoltosi a Zurigo, in cui uno dei workshop[53] organizzati per i ricercatori è stato proprio dedicato all'impiego di questo strumento; i vantaggi di Shaper Origin stanno nella snellezza e nella facilità di manovra, poiché pesa solo 6 kg. Rispetto ai centri di lavoro può richiedere tempi di lavorazione più lunghi e il cambio utensile avviene manualmente; tuttavia Shaper Origin non necessita di uno spazio ampio come quello di una macchina CNC e può essere utilizzata su qualsiasi piano orizzontale. Shaper Origin può contribuire a semplificare alcuni processi di lavorazione, soprattutto nel caso di lavorazioni puntuali o di piccole dimensioni, a differenza dei pannelli in legno che richiedono invece ampio spazio per la loro lavorazione.

Se il progetto d'architettura si esprimerà liberamente e risponderà puntualmente a numerose esigenze attraverso singoli differenti interventi, il mercato dei pannelli non risolverà ogni sviluppo progettuale, sarà invece la differenziazione della gamma di prodotti sul mercato ad esprimere la flessibilità della manifattura lignea. L'automazione, in questo caso, costituisce il mezzo per rendere effettiva ed efficace la flessibilità al questo settore produttivo.

XYLEXPO E ACIMALL

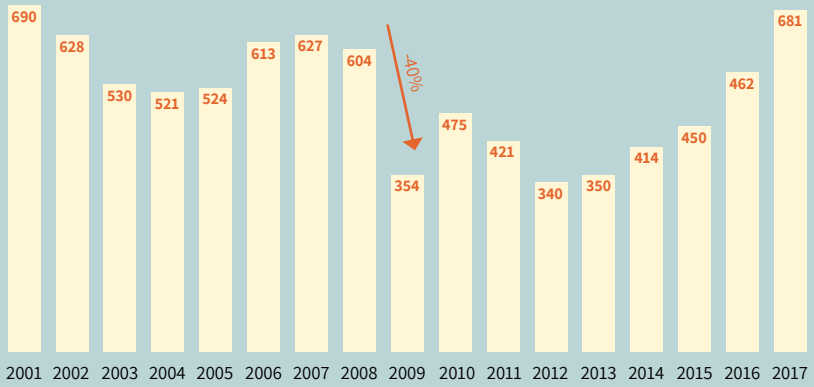
XYLexpo è la fiera biennale per la tecnologia e le macchine per la lavorazione del legno, per falegnameria e per carpenteria. XYLexpo, nata nel 1968 a Milano, rappresenta il più importante evento italiano del settore, a cui partecipano aziende e professionisti da tutto il mondo.
La fiera è organizzata, tramite CEPRA (Centro Promozionale Acimall Spa), dall'Associazione Costruttori Italiani di Macchine e Accessori per la Lavorazione del Legno ACIMALL (Milano, 1966), che rappresenta oggi il principale interlocutore delle istituzioni nazionali e internazionali con cui l'industria delle macchine della filiera del legno si confrontano, come ad esempio: Federmacchine Federazione che rappresenta le associazioni italiane della meccanica strumentale per altri settori; Eumabois la Federazione europea che raccoglie associazioni nazionali per la tecnologia per la filiera del legno; Confindustria; Uni, Ente nazionale italiano di unificazione; ITA, Italian Trade Agency; MISE, Ministero dello sviluppo economico. Afferiscono ad ACIMALL circa 160 aziende.
L'Italia a livello internazionale si contraddistingue per la produzione per la produzione di beni strumentali per le varie filiere manifatturiere: tale settore coinvolge circa 4600 imprese e nel 2017 registra una crescita dell'8,2% rispetto al 2016. Come descritto dal Rapporto Federmacchine 2018, questa industria esporta il 69% della produzione. Nella produzione di beni strumentali, di utensili e accessori per le macchine, ACIMALL registra un incremento del 10,5% tra il 2016 e il 2017, in cui anche l'esportazione cresce del 6,7% (ACIMALL, 2018).
La produzione di macchine è rivolta a differenti ambiti del settore del legno, dalle macchine utensili per lavorazioni di mobili e arredo, a centri di taglio automatizzati per la carpenteria lignea, in particolar modo per la produzione di pannelli in legno ad uso costruttivo. È rilevante la crescita del mercato interno pari al 21,1%, che corrisponde a una maggiore meccanizzazione del settore produttivo del legno. Le aziende infatti hanno potuto beneficiare di piani di finanziamento come il Piano Industria 4.0 per acquistare macchinari e software per la propria attività (tramite l'iperammortamento). Questa crescita si registra solamente a partire dal 2014, poiché gli anni precedenti avevano registrato un forte peggioramento, soprattutto nel 2008 in cui la produzione italiana di macchine e utensili per la lavorazione del legno calò circa del 40%: nel 2011 il livello di produzione italiano era ancora il 20% in meno rispetto le previsioni. Sono stati gli anni peggiori, soprattutto per il mercato interno: allo stesso tempo il gap tra le aziende medio grandi e le aziende micro piccole cresceva, poiché le prime riuscivano a sopravvivere e ad investire su macchinari per ottimizzare la produzione, mentre il fatturato delle seconde continuava a decrescere, con conseguente chiusura o acquisto dell'attività da parte di realtà multinazionali del settore.
Nel mercato delle esportazioni, l'Italia si mantiene al secondo posto come produttore mondiale di macchine per la filiera del legno dopo la Germania, che nel 2017 esporta 2360 macchine (+ 15% rispetto al 2016). L'Italia e la Cina ne esportano rispettivamente 1497 (+ 6%) e 1371 (+ 3%), a seguire Taiwan (617 macchine, pari a + 12%), Austria (470 macchine, parti a + 2%), USA (311 macchine, pari a -6%) (ACIMALL, 2018). La produzione italiana di macchine è rivolta soprattutto alla seconda trasformazione del legno, soprattutto alla produzione di pannelli: spicca tra queste realtà il gruppo SCM di Rimini, specializzato nella produzione di macchinari per differenti comparti manifatturieri, tra cui anche quello del legno (SCM Wood): SCM alla fiera XYLexpo 2018 era tra i maggiori espositori, insieme al gruppo BIESSE di Pesaro. Alla fiera sono stati presenti 425 espositori, di cui 116 provenienti dall'estero: la fiera ha riunito operatori del settore, specializzati nella produzione di macchine, di componenti, di utensili e di software per la gestione delle macchine e del processo

Tab. 1 EXPORT MACCHINE PER LEGNO: I SEI PRINCIPALI PAESI ESPORTATORI A LIVELLO MONDIALE
In milioni di Euro

Paese	2011	2013	2015	2017
Germania	1.969	1.709	1.899	2.362
Italia	1.198	1.111	1.328	1.450
Cina	679	790	1.114	1.372
Taiwan	471	458	551	617
Austria	350	356	449	470
Stati Uniti	267	284	337	311

Fonte dati ACIMALL 2018

Tab. 2 IL COMPARTO ITALIANO DELLE TECNOLOGIE PER LA LAVORAZIONE DEL LEGNO
Mercato interno in milioni di Euro



Fonte dati ACIMALL 2018

16. XYLexpo 8-12 maggio 2018, Milano. Le tre immagini sotto riprendono alcune fasi di lavorazione di un centro di taglio con mandrino multitesta: nell'immagine centrale viene eseguito il cambio utensile. A destra un braccio robotico per la movimentazione di elementii e un centro di taglio per la lavorazione di elementi in legno.



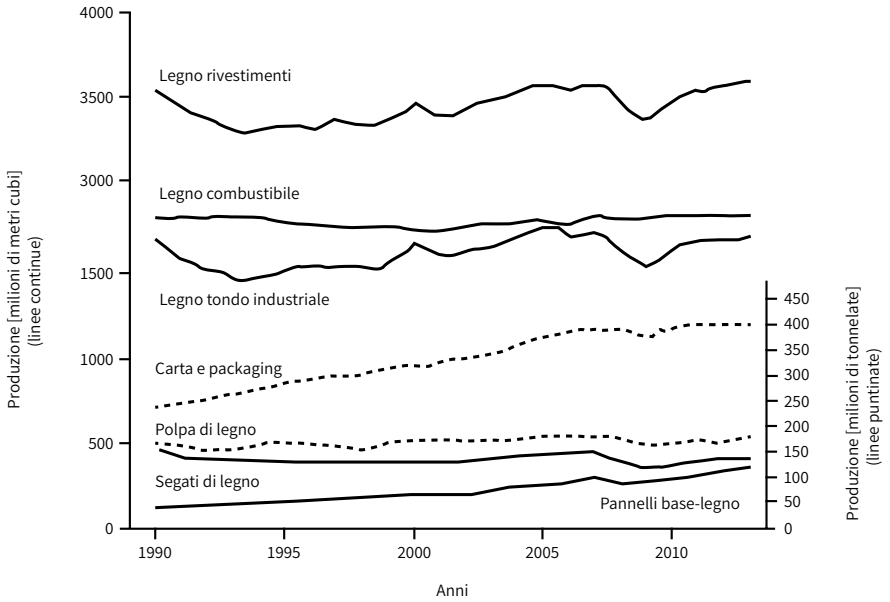








produttivo, strumento utile a un'azienda per monitorare lo stato di usura delle macchine, i livelli di produttività e il dispendio di energia.
La tipologia di macchinari esposti riguardava soprattutto macchine utensili, per la meccanizzazione di lavorazioni da falegnameria, e centri di taglio per la produzione di carpenteria lignea, in particolar modo per pannelli. Come confermato da alcuni rappresentanti, la tendenza delle aziende del settore è puntare sulla produzione di macchine e centri di taglio per la produzione di pannelli, sistema costruttivo che in Italia continua a crescere, come confermato anche da FederlegnoArredo (Rapporto FederlegnoArredo, 2018). I centri di taglio a controllo numerico rappresentano infatti oggi il comparto su cui viene investito maggiormente da parte delle grandi aziende produttrici di macchinari. Le innovazioni in questo comparto riguardano soprattutto:
- la dimensione e la mobilità del nastro: gli oggetti vengono fissati su un nastro che esegue movimenti in collaborazione con il mandrino; a questo viene aggiunta anche la modalità di fissaggio dell'elemento, che consente di eseguire lavorazione su tutte le superfici, poiché l'elemento non è più appoggiato al piano, ma pinzato;
- l'impiego di mandrini multitesta, su cui sono installati differenti tipologie di utensile, riducendo i tempi di cambio utensile e ottimizzando l'impiego di energia.
La combinazione degli assi di rotazione del mandrino e di quelli del nastro, accrescono i gradi di libertà complessivi del centro di taglio CNC e lo avvicinano sempre più alle prestazioni di un braccio robotico.
Il braccio robotico, attraverso la combinazione dei movimenti definiti dai giunti della sua struttura, può infatti raggiungere un numero elevato di gradi di libertà (per la robotica vengono definiti DOF Degrees Of Freedom). Nella filiera del legno, i bracci robotici trovano ampio impiego soprattutto per i processi di verniciatura e per lo spostamento di elementi: nell'industria del legno i bracci robotici non trovano ancora impiego come strumenti per l'asportazione di materiale, nota come manifattura sottrattiva.



16. Il 51% del legno prodotto viene utilizzato come combustibile, mentre il 38,1% viene impiegato nel comparto edile come elemento strutturale e non, sottoforma di pannelli ed elementi puntuali a base di legno, segati di legno(fonte FAO 2012). Ramage et al., 2017

3.7 Sostenibilità, durevolezza, durabilità

Il legno rappresenta ancora oggi un'importante risorsa, sia nella sua forma viva come pianta e albero, poiché contribuisce ad equilibrare l'ecosistema con la produzione di risorse per gli altri esseri viventi, sia in forma di prodotto lavorato, per la costruzioni di elementi più complessi quali ripari o strumenti utili alla vita umana. Tale risorsa viene sfruttata dall'uomo come fonte energetica (biomassa) o come materia da lavorazione: i settori in cui il legno viene impiegato richiedono differenti lavorazioni in funzione della scala e della dimensione della materia finale, dal legno massiccio utilizzato ad esempio nel settore edilizio, alla riduzione in fibre sottile per la produzione di carta (fig. 16). Il 38,1% della produzione mondiale di legname è rivolta al settore delle costruzioni e fornisce elementi di primo taglio (segati) come travi, tavole, listelli e piallacci; il 51% del legname viene lavorato per poter essere utilizzato come biomassa, mentre il 10,% per la carta e gli imballaggi.

Ragionare in merito alla sostenibilità di un mercato così vasto e in costante crescita è molto complesso e non può prescindere dal riferimento al ciclo di vita dei prodotti da costruzione e all'equilibrio ambientale della filiera del legno, in cui il comparto edilizio copre da solo 1/3 della produzione mondiale di legno. Un'indagine condotta dall'Università di Cambridge (UK)[54] sul ciclo di vita del legno in edilizia (Ramage et al., 2017) raccoglie dati per capire se il legno sia davvero un materiale da costruzione rispettoso dell'ambiente, come è diffusamente percepito: i processi che si attivano attorno al settore del legno possono avere incidenze elevate a livello ambientale e compromettere così l'effettiva sostenibilità del legno. Anche il fine vita dei prodotti incide sul bilancio generale: impiegare il legno in edilizia non significa necessariamente costruire in maniera sostenibile poiché il contenuto di colle, vernici o altre sostanze utilizzate per prodotti a base di legno, costringono a classificare il legno come rifiuto speciale al momento della sua dismissione e smaltimento.

Il mercato del legno che viene "trattato" con queste lavorazioni chimiche si

IL LEGNO COME RIFIUTO

Il legno è un materiale riutilizzabile e riciclabile a fine vita ma le possibili modalità di trattamento variano in modo sostanziale in funzione della tipologia di scarto in legno: pre- o post-consumo.
Il Italia il recupero di legno pre-consumo, ossia degli scarti di lavorazione di segherie, falegnamerie, carpenterie e mobilifici, è una pratica consolidata che porta alla produzione di una gamma molto ampia di sottoprodotti quali scaglie, trucioli e fibre. Questi, privi di vernici ed esenti da trattamenti chimici, sono materie prime secondarie facilmente reintroducibili nella filiera produttiva del legno per dare origine a nuovi prodotti quali pannelli truciolati o in fibra di legno, isolanti termo-acustici, blocchi in fibra di legno o prodotti della famiglia dei Wood Plastic Composite (WPC) in cui le fibre di legno sono aggiunte ad una matrice plastica che viene estrusa per formare rivestimenti o profilati. In tutti questi casi tuttavia la trasformazione del legno si configura come una forma di riciclo a ciclo aperto che porta ad una perdita di valore del materiale originale che, una volta triturato e miscelato con resine o leganti, perde le sue caratteristiche di riciclabilità ed eco-compatibilità. I prodotti derivati da questa trasformazione infatti non sono più riciclabili (o lo sono solo in minima parte) ma al contempo assumono caratteristiche di durabilità molto superiori a quelle del legno naturale.
Gli scarti di legno pre-consumo sono inoltre utilizzati per la produzione di pellet, trasformando in tal modo il rifiuto in combustibile per uso domestico. Il legno possiede infatti un buon livello di energia di feedstock, cioè di energia incorporata che può essere liberata mediante combustione. Tuttavia tale processo libera in atmosfera anche la CO2 catturata dal legno nelle fasi di crescita e sviluppo della pianta e si configura dunque come l'ultima opzione per il riutilizzo del rifiuto ligneo.
Le possibilità di recupero del legno post-consumo sono invece molteplici e presentano una complessità maggiore rispetto a quanto detto per gli scarti pre-consumo.
In primo luogo il legno può essere riutilizzato sia nel caso di elementi strutturali (travi, pilastri o pannelli) sia nel caso di elementi di rivestimento come doghe, tavole e listelli. In tale ambito sono sicuramente significative le tradizioni costruttive giapponesi e coreane in cui la periodica sistemazione dei templi comportava la sostituzione parziale o totale di alcune parti che venivano reimpiegate per costruzioni

più modeste, quali abitazioni private, mantenendo in alcuni casi anche l'apparato decorativo delle figure intagliate.
Nell'ambito del riuso è interessante anche il caso dei prodotti in legno lamellare e dei pannelli in X-lam che costruiscono uno dei settori di punta delle costruzioni lignee attuali. Tali prodotti, generalmente montati in opera a secco con sistemi di connessione in metallo facilmente rimovibili, possono essere reimpiegati con la stessa funzione in nuove costruzioni, mantenendo inalterato il loro livello prestazionale. In questo caso risulta fondamentale procedere ad un preventivo controllo degli elementi al fine di eliminare parti o componenti che abbiano subito nel tempo danni o alterazioni. In primo luogo va eseguita un'analisi visiva che determini lo stato dell'elemento e individui eventuali imperfezioni che potranno essere successivamente eliminate prima del riutilizzo del prodotto. Nel caso di componenti strutturali risulta poi necessaria una verifica prestazionale, condotta con appositi strumenti, per valutare la resistenza meccanica dell'elemento e determinarne la compatibilità con gli usi prestabiliti. Infine risulta necessario procedere ad una verifica della geometria. Il legno è infatti un materiale soggetto a forti alterazioni dimensionali in relazione alle condizioni igrometriche dell'ambiente in cui è impiegato; per tale motivo prima del suo riutilizzo può essere necessario ripristinare la planarità delle facce o la geometria complessiva del prodotto.
Significativa è infine anche la tradizione del restauro dei manufatti lignei, specialmente in ambiti come quello del mobile o del serramento, in cui attraverso azioni di protezione, ripristino o sostituzione parziale è possibile dare nuova vita agli oggetti in legno caratterizzati da valore storico o culturale.
Quando non è possibile il riutilizzo diretto i rifiuti lignei post-consumo questi possono essere riciclati. In linea generale i rifiuti edilizi in legno sono classificati con il Codice Europeo dei Rifiuti CER 17.02.01 "legno da costruzione e demolizione" (Codice Europeo del Rifiuto, CER, è l'elenco dei codici di classificazione dei rifiuti è stato recepito in Italia a partire dal 1° gennaio 2002), ossia come rifiuti speciali in legno non pericolosi (De Rosa et al, 2007, pag. 63). Per questa tipologia di rifiuto è possibile prevedere il conferimento a centri di riciclaggio dove il legno viene trasformato in nuovi prodotti mediante un processo meccanico: dopo una prima riduzione in volume il legno da riciclare subisce delle operazioni di pulizia seguite dalla triturazione in scaglie; segue una fase di selezione, per eliminare ogni corpo estraneo, e un'ulteriore fase di raffinamento per ottenere trucioli, fibre o particelle della dimensione idonea alla specifica lavorazione. Il materiale ottenuto passa ad un essiccatoio per poi essere compattato ed unito a speciali resine o leganti in opportune macchine formatrici per la produzione di pannelli, lastre o blocchi riciclati, da reintrodurre nel mercato come già descritto per gli scarti pre-consumo.
Non esistono attualmente dati statistici specifici in merito al trattamento a fine vita dei rifiuti lignei da costruzione e demolizione ma è possibile ricavare alcune informazioni relative alla gestione del legno post-consumo dai dati forniti del consorzio RILEGNO (Consorzio Nazionale per la raccolta il recupero e il riciclaggio degli imballaggi di legno) che si occupa della gestione e del recupero di imballaggi in legno. In tale ambito le pratiche del riuso e del riciclo sono molto avanzate: nel 2015, su un totale di 1.715.046 tonnellate di rifiuti lignei il 25,3% ha subito un processo di rigenerazione e re-immissione sul mercato, l'1% è stato avviato al compostaggio, il 3% al recupero energetico e il 34,7% ha subito un processo di riciclo per la produzione di pannelli (RILEGNO, Programma specifico di previsione, 2016). Dagli stessi dati è però emerso che solo il 3-4% del legno riciclato (ISPRA, Rapporto rifiuti speciali, Roma, 2015) per la produzione di pannelli è classificabile con il codice CER 17.02.01 "legno da costruzione e demolizione" in quanto molti dei materiali derivanti dall'edilizia non soddisfano i requisiti fissati dai protocolli per la produzione di pannelli in legno riciclato. La selezione delle partite di legno da riciclare deve infatti sottostare a una cernita molto accurata della materia prima, escludendo dal riciclo tutto il legno trattato con vernici, impregnanti o altre sostanze che possano poi produrre emissioni di VOCs in fase d'uso. Sono quindi esclusi tutti i prodotti in legno che contengano impurità (organiche o inorganiche) come ad esempio catrame, oli, fitofarmaci, impregnamenti d'olio da catrame o di sale a cromo. In queste categorie rientrano, ad esempio, le traversine ferroviarie ma anche il legno di vecchie finestre, scuri e tapparelle, nonché rivestimenti in legno verniciato.
Per i motivi appena descritti una delle possibilità di trattamento a fine vita del legno post-consumo è lo smaltimento in discarica. Sebbene il legno sia un materiale biodegradabile, la degradazione in discarica è un processo lento che richiede l'occupazione di suolo per lunghi periodi producendo al contempo biogas composto da anidride carbonica (40%) e metano (60%), due tra i gas serra più impattanti a livello di riscaldamento globale.
Infine, l'ultima opzione praticabile è l'incenerimento o termovalorizzazione. In questo caso, diversamente dal legno pre-consumo, siamo però di fronte a prodotti in cui il legno è stato trattato con vernici, impregnanti o colle, la cui combustione, oltre a liberare la CO_2 presente nel materiale, può generare impatti significativi dipendenti dal tipo di componenti aggiunti presenti. Oggi la ricerca spinge verso l'individuazione di soluzioni tecnologiche atte a ridurre o eliminare l'uso di questi prodotti favorendo lo sviluppo di colle e vernici biologiche, da utilizzare sia come protettivo del legno che come legante nel caso di prodotti in legno ricomposto, ma anche allo sviluppo di prodotti riciclati ottenuti mediante l'unione a secco con tasselli lignei di tavole da recupero. Queste prospettive rientrano in un ottica di chiusura dei cicli produttivi in cui ogni materiale a fine vita possa essere reintrodotto in una nuova filiera eliminando gli scarti e quindi senza comportare impatti eccessivi per l'ambiente.



sta fortemente espandendo e sta tendendo a soppiantare l'uso del legno massiccio grazie alla proposta di prodotti e materiali sempre più performanti e adatti a diverse tipologie di lavorazione e impiego. In questo modo, oltre ad abbassare il livello di sostenibilità del progetto, si rischia di snaturare il legno, rendendolo un materiale altro, detto "naturartificiale" (Tatano, 2006).

La ricerca della sostenibilità delle costruzioni in legno, in un'ottica di economia circolare, non si limita solamente al corretto smaltimento dei materiali di scarto o di demolizione, ma coinvolge in senso più ampio la progettazione. Il concetto di sostenibilità fu introdotto per la prima volta proprio in riferimento all'uso sostenibile di risorse forestali e alle procedure di selvicoltura proposte da Hans Carl von Carlowitz nel Settecento[55] (Albrecht, 2014). La sostenibilità riguarda quindi la capacità di progettare con lungimiranza l'impiego di una risorsa come il legno, al fine di poter garantire tale risorsa anche alle generazioni successive. Per questo motivo in tedesco il termine utilizzato per indicare il concetto di sostenibilità fa riferimento alla parola *Nachhaltigkeit*, che indica persistenza e durevolezza. Con durevolezza si fa riferimento a una condizione da progettare (Bonamini, 2017), affinché un materiale possa durare a lungo nel tempo: nel caso del legno la durevolezza va distinta dalla durabilità, poiché quest'ultima si riferisce invece a una caratteristica intrinseca del legno, e cioè alla capacità del legno di resistere agli attacchi di funghi e insetti[56].

Nel caso della carpenteria lignea, la sostenibilità comporta la progettazione della durevolezza del manufatto, ovvero la capacità di far durare nel tempo elementi in legno, basandosi sulle caratteristiche intrinseche del materiale impiegato (della sua durabilità) e delle condizioni dell'ambiente che possono variare nel tempo: per questo motivo la sostenibilità intesa come la capacità di resistere agli attacchi biotici (muffe e funghi) o xilofogi (insetti) nel tempo, non è ridotta alle proprietà chimiche della materia e all'impiego di sostanze artificiali per migliorarne le prestazioni naturali, ma riguarda anche la morfologia del componente e la progettazione del sistema in cui gli elementi in legno vengono inseriti, al fine di realizzare un ambiente adatto al legno (ad esempio un ambiente in cui l'umidità si possa asciugare e non ristagnare) e un sistema in grado di consentire la sostituzione parziale o totale delle parti ammalorate.

Il progetto dell'architetto consente di sviluppare la durevolezza di un prodotto, il che non significa rendere eterno un elemento costruttivo ma garantirne un uso appropriato rispetto alla sua messa in opera e alla sua natura: se il legno ha una durata limitata nel tempo, la progettazione appropriata ha il compito di permettere che il suo comportamento si mantenga costante in corso di esercizio e ciò è importante soprattutto operando in ambito strutturale. Per costruire in maniera sostenibile, non è sufficiente impiegare il legno, ma bisogna prima di tutto progettare assecondando la natura propria del materiale e quindi il suo naturale degrado. La sostenibilità esprime quindi un rapporto tra l'impiego di una risorsa e la sua durata nel tempo, che va anche oltre il mero valore materiale: "Il patto tra le diverse generazioni per un futuro degno è allo stesso tempo l'aver coscienza del valore delle azioni del passato e la necessità della conservazione dei beni materiali agibili per il futuro" (Albrecht, 2014, p. 24).

Progettare in maniera sostenibile in legno non significa quindi realizzare un manufatto in cui la materia del legno deve sopravvivere nel tempo, ma sviluppare un edificio in cui vengano affermate le tecniche e la cultura materiale sottese all'impiego del legno. La manutenzione è parte integrante del progetto sostenibile e predisporla significa prendere consapevolezza dei limiti intrinseci

DURABILITÀ

La durabilità nelle costruzioni in legno riguarda in primo luogo la natura biologica dei materiali e si riferisce sia elementi in legno massiccio che ai derivati del legno quali pannelli. La normativa definisce la durabilità come la "resitenza del materiale al degradamento indotto da organismi lignivori" (UNI EN1001-2:2005 Durabilità del legno edei prodotti a base di legno – Terminologia"). Inoltre nel "Guidance paper F - Durability and CPD" contenuto nella Direttiva Prodotti da Costruzione 89/106/CEE (CPD), viene stabilito che i prodotti marcati CE debbano garantire protezione alla salute, all'ambiente e alla sicurezza degli utilizzatori intendendo la durabilità "come un aspetto traversale che coinvolge l'insieme dei fattori in grado di compromettere la capacità di mantenere nel tempo (ovvero per un periodo di esercizio economicamente ragionevole) le prestazioni richieste dall'impiego di una struttura o di un materiale (quindi sotto l'influenza delle azioni previste e a fronte di un'ordinaria manutenzione)" (Giachino, 2013, p. 53). Infine, con la modifica della direttiva CPD in Regolamento Prodotti da Costruzione (CPR305/2011) entrato in vigore nel 2013 la durabilità viene ricompresa nel settimo requisito inserito, ossia l'uso sostenibile delle risorse naturali, definendo la durabilità come prestazione essenziale per la sostenibilità di un prodotto.

La durabilità è strettamente collegata al degrado biologico del legno dovuto a fattori biotici o abiotici. In quanto materiale organico, il legno è infatti soggetto a variazioni indesiderate che ne possono modificare sia le caratteristiche superficiali che le proprietà meccaniche. I fenomeni superficiali possono essere dovuti all'azione della luce o degli agenti atmosferici, mentre le proprietà meccaniche possono essere alterate da fenomeni che si spingono più in profondità legati all'umidità o all'azione di organismi xilofagi. Non esiste una strategia universale per garantire la durabilità del legno, esistono invece delle buone pratiche costruttive che possono migliorarne le condizioni di servizio e quindi la durata (Laner, 2005). La prima di queste buone pratiche riguarda la scelta della specie legnosa più adatta ad uno specifico ambito di impiego. Non tutte le specie di legno presentano infatti le stesse caratteristiche di durabilità dato che questa è fortemente connessa alla resistenza della specie alle azioni di degrado dovuti ad organismi lignivori e al tasso di assorbimento di umidità tipico di ogni legno.

L'umidità è il fattore che incide in modo più rilevante sul comportamento del legno. Il legno, che per sua natura è igroscopico e poroso, assorbe infatti l'umidità e questa è causa di rigonfiamenti o ritiri che possono incidere sulle prestazioni meccaniche del legno ma può anche può favorire lo sviluppo di funghi e rendere il legno più attaccabile da insetti. Tali fattori influenzano in modo diretto la durabilità del prodotto ligneo. L'umidità nel legno è presente sottoforma di "acqua libera presente nei lumi cellulari a umidità del legno superiore al punto di saturazione e l'acqua legate alle pareti delle cellule. La prima peraltro si muove per capillarità e determina solo variazioni di massa" (Giachino, 2013, p. 55). Il ritiro volumetrico del legno corrisponde alla riduzione (in termini %) del volume del legno dallo stato fresco a quello anidro. Tale variazione è strettamente connessa alla specie legnosa ma anche alle condizioni in cui la pianta si è sviluppata, poiché gli anelli di crescita sono disposti più o meno strettamente, e determinano la variabilità del ritiro. Il ritiro inoltre può variare a seconda delle direzioni anatomiche in cui il legno viene tagliato (radiale, longitudinale, tangenziale), vista la natura anisotropa del legno.

Per questo motivo le fasi di essicazione e di controllo dell'ambiente dei prodotti in legno sono fondamentali e rimandano buone pratiche di essicazione naturale del legno, lasciando i rami e il tronco lungo i pendi: in tal modo la forza di gravità e l'istinto naturale della pianta di portare sostanza nutritive verso le estremità, avrebbero nel tempo asciugato il fusto (Thoma, 2013), rendendo cosi il legno più durevole.

Il ritiro causa fessurazioni nel legno e comportamenti come l'imbarcamento delle tavole tangenziali. Tali fenomeni, oltre modificare l'aspetto del prodotto ligneo possono alterane le caratteristiche meccaniche e, soprattutto nel caso di fessurazioni, costituire un incremento della vulnerabilità agli agenti atmosferici e boitici.

A contribuire alla durabilità del legno, agendo sulla resistenza dagli attacchi sia biotici che xilofagi, è infine anche la chimica del legno: l'alburno, tendenzialmente più giovane del durame è infatti più soggetto ad attacchi da parte di organismi lignivori, mentre il durame lo è meno. Al suo interno sono presenti infatti sostanze chimiche dette estrattivi tra cui i più noti sono oli essenziali e le resine (terpeni) ma anche i tropoloni, polifenoli (tra cui tannini idrosolubili e insolubili), carboidrati e composti azotati che si sviluppano con la crescita della pianta (tale processo è conosciuto come duramificazione). L'intensità cromatica del durame corrisponde ad una maggior concentrazione di estrattivi e ciò coincide con una maggiore durabilità. L'alburno invece è soggetto ad attacchi proprio perché contiene zuccheri di riserva per la pianta, che costituiscono anche il principale nutrimento per gli insetti. La composizione chimica della parete cellulare è differente e può essere più o meno soggetta ad attacchi biologici, quindi non contribuisce direttamente alla durabilità del legname. Per questo motivo "la durabilità del legno è sempre riferita al solo durame nel caso dei funghi e delle ermini e all'alburno quando invece il rischio è determinato da coleotteri e anobidi. In altri termini l'alburno di qualsiasi legname deve sempre essere classificato come non durabile nei confronti dei funghi cariogeni. Solo il legname di alcune specie di origine tropicale è naturalmente re-

Specie Legnosa		Ritiro totale (medio)			
		Assiale [%]	Radiale [%]	Tangenziale [%]	Volumetrico [%]
Conifere	Abete bianco	0.35	3.5	7.2	11.0
	Abete rosso	0.30	3.8	8.5	12.7
	Cipresso	-	4.5	6.4	10.4
	Douglasia	-	4.8	8.8	14.2
	Larice	-	3.4	8.3	13.8
	Pino silano	0.20	4.3	8.6	13.3
	Pino silvetro	0.40	4.1	8.3	13.0
Latifoglie	Castagno	0.30	4.3	6.6	11.2
	Cerro	-	5.3	13.0	19.2
	Faggio	0.20	5.8	10.0	17.0
	Farnia/Rovere	0.40	4.4	8.3	13.2
	Frassino	0.20	4.9	9.2	14.2
	Noce	-	5.0	7.3	13.0
	Olmo	-	5.1	8.3	13.8
	Robinia	0.10	3.8	6.8	14.2
	Tiglio	-	5.6	9.2	15.0

Tab. 1 Ritiro totale del legno massiccio per variazioni di umidità tra il punto di saturazione delle pareti cellulari e lo stato anidro

del naturale degrado di un materiale.

Gli strumenti a disposizione dei progettisti per valutare la qualità dei prodotti in legno, e quindi per progettare in modo appropriato, non sono ancora molti nonostante il mercato in crescita e l'evoluzione delle esigenze. Sono presenti diverse forme di etichettatura per i prodotti e di certificazione per i processi di lavorazione, queste sono valide a livello internazionale e fanno riferimento soprattutto all'ambito della sostenibilità, permettendo di tracciare la filiera produttiva, di riconoscere la zona di provenienza del legname e le lavorazioni effettuate sul prodotto.

Un'etichetta obbligatoria per ogni prodotto in legno ad impiego strutturale è la marcatura CE, cioè la Conformità Europea rispetto ai parametri di sicurezza stabiliti dall'Unione Europea. Questo strumento consente di determinarne le principali caratteristiche tecniche e renderne possibile il commercio all'interno del contesto europeo. Tale marchio è stato introdotto con la direttiva CEE 89/106 ed è oggi normato dal Regolamento dei Prodotti da Costruzione (CPR - *Construction Products Regulation*): il fine è garantire la produzione, il commercio e l'utilizzo dei prodotti edilizi che rispettino la salute dell'uomo e dell'ambiente. La marcatura CE riporta informazioni sulla specie di legno e tipologia del prodotto, quindi il materiale utilizzato, i dati del centro di lavorazione e altre informazioni utili alla sua messa in opera, come il comportamento al fuoco, al rumore e la sicurezza in termini d'igiene, indicando le eventuali dispersioni in ambiente di sostanze dannose per la salute dell'uomo. Nell'etichetta CE sono riportate altre due importanti informazioni: la classe di resistenza[57], che fa riferimento alle proprietà meccaniche del legno, e la classe di durabilità del legno, che riguarda invece la capacità del legno di mantenere intatta nel tempo la propria conformità fisica (entrambe le classi fanno riferimento alla norma EN 338:2002).

Il valore della classe di durabilità è strettamente connesso alla probabilità di attacchi biotici e xilofagi, parametri parziali per la valutazione della durabilità di un elemento ligneo e non sufficienti per consentire un giudizio sulle prestazioni di durevolezza complessive del prodotto, come precedentemente descritto. La durabilità resta quindi una delle caratteristiche più complesse da certificare poiché rimanda a garanzie relative a prestazioni meccaniche e fisiche che non sempre sono controllabili nel caso di prodotti in legno massiccio che non sono omogenei[58], a differenza dei prodotti a base di legno, in cui la selezione dei materiali permette di controllare più accuratamente la conformità della materia.

Nell'etichetta CE sono riportati anche la specie di legno e la provenienza del legno, che contribuiscono parzialmente alla valutazione di durabilità del prodotto. Infatti, elementi lignei della stessa specie possono presentare caratteristiche tecniche differenti perché provenienti da zone geografiche differenti, in cui le condizioni ambientali hanno condizionato la crescita della pianta[59]. Inoltre, nel caso del legno massiccio, le modalità di stoccaggio e le lavorazioni che questo può subire in cantiere possono incidere sulla durabilità variando quanto dichiarato dalla marcatura CE.

A livello di processo, si possono distinguere due tipologie di procedimento per incrementare la durevolezza di un prodotto ligneo:

- i trattamenti di natura chimica o di natura fisica che vengono poste in atto prima della trasformazione del legno in prodotto lavorato, è un procedimento rivolto al carattere di durabilità del legno;
- le lavorazioni che vengono poste in atto nei processi di modellazione del prodotto stesso, che riguardano la progettazione dell'elemento ligneo e la sua lavorazione: è un procedimento rivolto alla durevolezza dell'intero

	Specie Legnosa	Classi di durabilità naturale				Impregnabilità		
		Funghi	Coleotteri (Hyl)	Anobidi (Anob)	Termiti (Ter)	Durame	Alburno	Estensione Alburno
Conifere	Abete bianco	4	NRH	NRH	NR	2-3	2v	x
	Abete rosso	4	NRH	NRH	NR	3-4	3v	x
	Douglasia	3-4	NR	NR	NR	4	2-3	s
	Larice	3-4	NR	NR	NR	4	2v	s
	Pino silvetre	3-4	NR	NR	NR	3-4	1	s-m
Latifoglie	Betulla	5	-	NR	NR	1-2	1-2	x
	Castagno	2	-	NR	MR	4	2	s
	Faggio	5	-	NR	NR	1	1	x
	Iroko	1-2	-	-	R	4	1	m
	Khaya	3	-	-	NR	4	2	s
	Moabi	1	-	-	R	3-4	-	m
	Noce	3	-	NR	NR	3	1	s
	Okoumè	4	-	-	NR	3	-	s
	Pioppo	5	-	NR	NR	3v	1v	x
	Robinia	1-2	-	NR	R	4	1	ms
	Rovere	2	-	NR	MR	4	1	s
	Sapelli	3	-	-	MR	3	2	m
	Sipo	2-3	-	-	MR	4	2	m
	Teak	1-3	-	-	MR	4	3	s

Tab. 2 Classificazione della durabilità naturale del legno massiccio delle principali conifere e latifoglie
Legenda Durabilità naturale
Verso funghi: 1=molto durabile, 2=durabile, 3=moderatamente durabile, 4=poco durabile, 5=non durabile
Verso insetti (Hyl e Anob): NHR=durame non resistente, NR=non resistente, R=resistente
Verso termiti: MR=moderatamente resistente, NR=non resistente, R=resistente
Impregnabilità: 1=impregnabile, 2=moderatamente impregnabile, 3=poco impregnabile, 4=non impregnabile, v=alta variabilità
Estensione alburno: m=medio (5-10 cm), ms=-molto sottile (minore di 2 cm), s=sottile (2-5 cm), x=nessuna distinzione tra durame e alburno

sistente a tutti li attacchi biologici" (Giachino, 2013, p. 60).
Sulla base di queste considerazioni le norme definiscono le classi di durabilità naturale, le classi di servizio e le classi di utilizzo del legno massiccio. In particolare le norme UNI EN 350-1:1996 "Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno. Durabilità naturale del legno massiccio. Guida ai principi di prova e classificazione della durabilità naturale del legno" e la UNI EN 350-2:1996 "Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno. Durabilità naturale del legno massiccio. Guida alla durabilità naturale e trattabilità di specie legnose scelte di importanza in Europa" definiscono le classi di durabilità, a seconda della specie legnosa, riferita a differenti agenti xilofagi (tabella 2). Le classi individuate sono cinque per la resistenza all'attacco dei funghi, due nei confronti dei coleotteri e tre verso termiti e organismi marini, in cui la durabilità diminuisce al crescere dalla classe. Le norme definiscono inoltre altri due parametri: l'impregnabilità di durame e alburno che indica la capacità di tali strati di assorbire umidità (4 classi). Ciò offre un dato utile a comprendere la facilità di assorbimento dell'umidità e quindi l'aumento di rischio di attacco biologico ad essa connesso ma, contemporaneamente, offre una indicazione sulla facilità di applicazione di prodotti protettivi. Ulteriore dato fornito è l'estensione dell'alburno che, come già precisato, risulta essere l'elemento più debole in termini di durabilità. Il parametro offre una dato relativo allo spessore dello stato e quindi in merito ad un potenziale rischio di attacco xilofago.
La durabilità naturale del legno è però influenzata dalle condizioni di utilizzo. Per questo la UNI EN 1995-1-1:2009 Eurocodice 5 "progettazione delle strutture in legno. Regole generali- Recole comuni per gli edifici" definisce tre classi di servizio relative alle prestazioni meccaniche del prodotto ligneo in funzione a diverse classi ambientali:
-Classe di servizio 1: l'umidità del materiale non eccede il 12% con temperatura ambientale di 20°C e umidità relativa dell'aria circostante che supera il 65% solo per alcune settimane all'anno;
-Classe di servizio 2: l'umidità del materiale non eccede il 20% con temperatura ambientale di 20°C e umidità relativa dell'aria circostante che supera l'85% solo per alcune settimane all'anno;
-Classe di servizio 3: l'umidità del materiale supera il 20%;
Tali classi, definendo un tasso crescente di umidità nel legno in funzione all'ambiente in cui è utilizzato individuano un potenziale aumento del rischio di attacco biologico. Tali classi di servizio sono correlate alle classi di utilizzo definite dalla UNI EN 350-2:1996 oggi sostituita e integrata dalla UNI EN 350:2016. Essa individua 5 situazioni di esposizione possibili corrispondenti a potenzialità crescenti di attacco da parte dei vari agenti biologici (tabella 3).
Le prime tre classi di utilizzo corrispondono alle tre classi di servizio, mentre la classe di utilizzo 4 e 5 sono casi più rari di applicazione in cui il legno è soggetto a farti rischi di attacco. Nelle prime due classi di utilizzo il rischio è invece più ridotto, mentre la classe 3 risulta quella più diffusa e problematica. Spesso il legno utilizzato in condizioni di utilizzo assimilabili alla classe 3 richiede dei trattamenti protettivi per garantire la durabilità richiesta dalla prescrizioni di progetto. Per tale motivo la norma UNI EN 460:1996 "Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno. Durabilità naturale del legno massiccio. Guida ai requisiti di durabilità per legno da utilizzare nelle classi di rischio" definisce un criterio di relazione tra le classi di utilizzo (che nella norma sono tuttavia ancora definite classi di rischio) e le classi di durabilità naturale del legno al fine di individuare la necessità di un trattamento protettivo (tabella 4).
Grazie alle informazioni riportate nella marcatura CE e alle tabelle fornite dalle normative di riferimento il progettista può quindi individuare specifiche condizioni di rischio legate alla specie legnosa impiegata e alla condizione di utilizzo e prevedere opportuni sistemi di trattamento protettivo del prodotto in legno massiccio.
La classificazione è più complessa nel caso di elementi derivati dal legno, quindi pannelli a base di legno o legno lamellare. In questo caso i prodotti presentano caratteristiche differenti dal legno massiccio in quanto hanno subito lavorazioni e trattamenti che, se da un lato possono rendere più resistente il legno agli attacchi xilofagi, dall'atro creano delle condizioni di criticità in corrispondenza dei bordi dei pannelli. La norma UNI EN 335-3:1998 "Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno - Definizione delle classi di rischio di attacco biologico - Applicazione ai pannelli a base di legno" sostituita e integrata dalla UNI EN 335:2013 "Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno - Classi di utilizzo: definizioni, applicazione al legno massiccio e prodotti a base di legno" definisce anche per i pannelli la classificazione

sistema costruttivo ligneo.

La prima tipologia di lavorazioni si affida a trattamenti che alterano le caratteristiche del legno rendendolo più resistente alle azioni di degrado. I preservanti sono le sostanze più frequentemente impiegate nei trattamenti chimici: sono prodotti tossici e le direttive europee si fanno sempre più stringenti al fine di ridurne o eliminarne l'impiego, in particolar modo se il legno è destinato all'uso in ambienti domestici[60]. Tra i trattamenti di natura fisica il più diffuso è l'essicazione tramite termotrattamento, che consiste nel portare il legno a temperature elevate per accelerarne la naturale stagionatura.

Alla seconda tipologia di procedimenti volti a incrementare la durevolezza di un prodotto ligneo appartengono le lavorazioni che riguardano tutte le fasi del processo, dal taglio dei fusti alla produzione dei singoli elementi: non esistono regole o strategie applicabili in modo assoluto, ma le buone pratiche ereditate dalle tecnologie e dai sistemi costruttivi storici possono offrire utili spunti di riflessione. Ad esempio, contrariamente a quanto avviene con il termotrattamento, il sistema tradizionale per essiccare il legno prevede di lasciare il fusto (completo dei propri rami) lungo un pendio affinché la forza di gravità e "l'istinto naturale" della pianta di portare sostanze nutritive alle estremità dei rami possano, nel tempo, asciugare il fusto (Thoma, 2013). Scendendo alla scala del prodotto, è esemplare il caso del taglio della scandola[61]: il taglio viene effettuato lungo la direzione della venatura e, se viene eseguito tramite lavorazione manuale tradizionale detto "fenditura", offre un risultato differente rispetto a quello ottenuto con una lavorazione meccanica, basata invece sulla segatura. Il taglio manuale avviene impiegando specifici strumenti, un maglio e un coltello dalla forma apposita (chiamato coltello da scandole): il coltello ricorda un'ascia, ha un manico in legno e sulla sua estremità è inserita una testa in metallo dalla forma allungata, con lama predisposta su lato lungo ed esterno del coltello. La fenditura delle scandole consiste nel battere una serie di colpi sul coltello (prima sulla testa e poi, man mano che la lama affonda nel legno, sul manico) procedendo gradualmente e dividendo le fibre del legno senza interromperne lo sviluppo; al contrario, il taglio meccanico non ha questa adattabilità e procede in modo omogeneo senza seguire la naturale tessitura delle fibre che vengono tagliate ottenendo una superficie estremamente liscia. La scandola ottenuta attraverso taglio meccanico, sebbene esteticamente simile a quella artigianale, ha le fibre interrotte e questa caratteristica rende la superficie dell'elemento meno omogenea poiché i condotti linfatici sono aperti e soggetti alle condizioni ambientali esterni: per questo motivo la scandola prodotta attraverso un procedimento di segatura meccanica risulta meno resistente alle intemperie.

Infine, la durevolezza dei componenti lignei e dell'opera costruita nel suo insieme è sviluppata operando a livello di progetto, e ciò deve essere fatto tenendo in considerazione tutti i trattamenti, gli aspetti e le lavorazioni di cui si è parlato in precedenza. La pratica costruttiva antica riconosce l'importanza di alcuni elementi della costruzione (sia portanti che non) e la tradizione esecutiva vuole che questi vengano protetti con elementi lignei detti "di sacrificio", cioè sostituibili e posti in opera al solo fine di degradarsi per primi e di proteggere così gli altri elementi meno esposti e più importanti per il sistema strutturale: tale pratica tuttavia oggi si scontra con l'eccessiva tendenza alla conservazione di ogni parte di un manufatto storico (Laner, 2018, p.95). Casi emblematici basati sulla pratica progettuale della sostituzione, con l'obiettivo di garantire la durabilità delle architettura in legno, sono le stavkirke norvegesi[62], che esistono in quanto continuamente oggetto di manutenzioni e sostituzioni di parti, e i

Classe di utilizzo	Situazione di servizio (ambiente di esposizione)	Umidificazione del legno nelle condizioni di servizio	Agenti biologici connessi al rischio
1	Interno sotto copertura (speso riscaldato)	Secco	Insetti
2	Interno sotto copertura o esterno protetto	Occasionalmente umido	Insetti Funghi (carie e cromogeni)
3	Esterno, non a contatto con il terreno	Da occasionalmente a frequentemente umido	Insetti Funghi (carie e cromogeni)
4	Esterno a contatto con terreno o acqua dolce	Prevalentemente umido	Insetti Funghi (carie, carie soffice e cromogeni)
5	A contatto con acqua salata	Costantemente umido	Funghi (carie e cromogeni) Organismi marini Insetti nella parte emersa

Tab. 3 Classi di utilizzo, livello di umidificazione e potenziali agenti di biodegradamento

in 5 classi di utilizzo individuando quindi una correlazione tra i prodotti il legno massiccio e quelli a base di legno.
La durabilità del legno può essere incrementata da trattamenti di natura chimica o fisica. Nel caso dell'impiego di preservanti di natura chimica le direttive europee si fanno sempre più restringenti, in particolar modo in riferimento a quei materiali impiegati negli ambienti domestici. Tra i prodotti più impiegati ma oggi proibiti troviamo i preservanti a base di arsenico e cromo. Il primo in particolare è stato limitato dalla Direttiva 2003/2/CE che ne impedisce a tutti gli effetti l'uso in trattamenti su prodotti destinati al contatto con l'uomo, mentre ne consente l'uso in caso di strutture industriali o infrastrutturali. In sostituzione ai preservanti a base di arsenico sono stati ormai da anni introdotti prodotti a base di boro, azolati e rame, meno pericolosi per l'uomo ma che possono incidere sul metallo impiegato per i connettori, per questo motivo è sempre meglio utilizzare elementi zincati o in acciaio inox.
I trattamenti preservanti devono in ogni caso rispettare le specifiche definite al alcune norme UNI: in particolare la UNI EN 460:1996 "Guida ai requisiti di durabilità per legno da utilizzare nelle classi di rischio" per definire la necessità o meno del trattamento, mentre la tipologia di trattamento è definita dalle norme UNI EN 351-1:2008 "Classificazione di penetrazione e ritenzione del preservante" e UNI EN 599-1:2009 "Efficacia dei preservanti del legno", di cui la prima riferita al legno massiccio, la seconda ai prodotti derivati in legno.
Una alternativa al trattamento chimico è il termo trattamento che consiste nello scaldare in modo controllato il legno a temperatura elevate (tra 180 e 230°C). Questa procedura diffusa a partire dagli anni Novanta contribuisce a ridurre l'umidità e altre sostanze volatili all'interno del legno, senza il rischio di combustione, riducendo allo steso tempo la conducibilità del materiale e limitando i fenomeni di ritiro del legno. Il termotrattamento tuttavia può comportare ricadute negative sul comportamento meccanico finale e sulla lavorabilità del materiale.
Inoltre, poiché la riduzione della porosità del legno è proporzionale alla velocità con cui questo si asciuga, la stagionatura forzata non consente al legno di adattarsi gradualmente e quindi di ridurre al contempo la propria porosità. L'essicazione quindi rende il materiale idoneo all'impiego dal punto di vista dell'umidità, ma lo rende più soggetto a fenomeni di assorbimento dell'umidità nella fasi successive alla posa in opera (Thoma, 2009, p. 80). Infine, il processo di essicazione termica è piuttosto energivoro: il 90% dell'Emboied Energy incorporata in un prodotto del legno dipende infatti dalla fase di essicazione (Ramage et al., 2015, p. 345).
Infine, come ultimo aspetto legato alla durabilità del legno è necessario considerare il ruolo della progettazione, che considerando la natura organica della materia legno, la sua morfologia, la posa in opera e il sistema di collegamenti deve farsi carico di valutare limiti e potenzialità di un prodotto in legno definendone innanzi tutto un adeguato piano di manutenzione. La conformazione fisica del legno (ad esempio la disposizione degli anelli, la presenza di nodi, sacche di resina, ecc.), possono costituire infatti potenziali difetti, che se non opportunamente riconosciuti, possono essere nel tempo causa di degrado e di perdita di prestazione meccanica da parte delle strutture lignee. Tali caratteristiche non possono essere direttamente modificare dall'uomo, ma il progettista deve tenere in conto accorgimenti per la posa in opera che possano minimizzare i danni derivanti da questi "naturali difetti". Ma soprattutto il progettista deve mettere in campo competenze e buone pratiche volte a ridurre al minimo l'esposizione del legno ad agenti degradanti come l'acqua, la luce e gli insetti xilofagi. Le classi di utilizzo e di servizio, e la progettazione complessiva della struttura, determinano la durata del ciclo di vita di un edificio in legno, il cui limite può considerarsi pari a 100 anni. In tale intervallo di tempo la progettazione in deve però considerare anche la manutenzione degli elementi lignei, prevedendo sia interventi di ripristino dello strato di protezione che l'eventuale sostituzione di parti ammalorate. Per questo motivo anche l'intercambiabilità dei componenti in un progetto può incidere sulla durabilità complessiva dell'edificio, favorendone la conservazione mediante semplici interventi di sostituzione delle parti degradate e non più capaci di rispondere ai requisiti richiesti dal progetto.
Nel passato questa consapevolezza era alla base della progettazione come dimostrano le stavkirke norvegesi o i templi giapponesi, che erano progettati sulla base della sostituibilità dei pezzi, inserendo talvolta elementi di sacrificio, altre volte consentendo una sostituzione parziale o totale del manufatto.
Infine la progettazione esecutiva dei componenti in legno deve considerare anche il potenziale di deformazione dell'elemento, che è determinato anche dalla durata della stagionatura e dal tipo di essicazione: un materiale poco stabile non è adatto per elementi sagomati e incastrati gli uni con gli altri in quanto le deformazioni potrebbero alterare la stabilità dei giunti, se non opportunamente progettati per consentire adeguati spostamenti e dilatazioni reciproche.
Per concludere, richiamando nuovamente Giachino, la durabilità del legno "deve comunque essere considerata sin dalle prime fasi di ideazione e progetto, prevedendo di valutare una serie di parametri, soprattutto in rapporto alla situazione e alle aspettative di servizio dell'opera, che guidano alla corretta scelta dei materiali legnosi e di un loro eventuale trattamento, unitamente a opportuni accorgimenti tecnici, spesso di facile attuazione e dal costo contenuto, e a un'adeguata programmazione degli interventi di manutenzione o sostituzione di eventuali elementi degradati, tale approccio consente alle componenti lignee di svolgere in maniera ottimale la funzione richiesta, garantendo l'affidabilità e la durata previste senza rappresentare quel ruolo di punto debole che il genere viene loro attribuito" (Giachino, 2013, p. 52).

Classe di utilizzo	Classi di durabilità naturale del legno massiccio				
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	(0)	(0)
3	0	0	(0)	(0) - (X)	(0) - (X)
4	0	(0)	(X)	X	X
5	0	(X)	(X)	X	X

Tab. 4 Relazione tra le classi di utilizzo e le classi di durabilità naturale del legno
Legenda
0=durabilità naturale sufficiente
(o)=durabilità naturale generalmente sufficiente ma in alcuni casi può essere necessario un trattamento protettivo
(o) – (X)=durabilità naturale generalmente sufficiente ma per alcune specie e in certe condizioni di impiego può essere necessario un trattamento protettivo
(X)=trattamento preservante normalmente necessario
X=trattamento preservante necessario





templi giapponesi[63], progettati in parti sostituibili, in forma parziale e totale.

Per progettare la durabilità degli elementi lignei che vengono posti in opera in un'architettura non è sufficiente la conoscenza della materia prima, che viene verificata osservando, ad esempio, la disposizione degli anelli di crescita, la presenza di nodi o sacche di resina[64]: il legno è un materiale che risente dell'ambiente circostante e continua a mutare in funzione di esso. È fondamentale pensare ai possibili comportamenti del legno nel tempo, nelle fasi successive alla stagionatura, nelle operazioni di taglio e di messa in opera: la progettazione esecutiva dei componenti in legno deve, ad esempio, considerare le tolleranze di deformazione dell'elemento, sulle quali influisce anche la durata della stagionatura o dell'essicazione. La progettazione di una struttura lignea deve occuparsi dell'intera vita degli elementi, dal taglio del tronco alla manutenzione dell'elemento in opera, valutandone anche la sostituzione e dismissione. La stessa attenzione va posta anche nella progettazione di elementi lignei, dove però il fattore di degrado superficiale e naturale del legno, può divenire parte del progetto, soprattutto nel caso di elementi di rivestimento: un caso esemplare è il padiglione sull'acqua di Tomba Brion, i cui sei pannelli sono composti da doghe in larice e il loro aspetto è frutto di quella che può essere definita una "trasformazione progettata" (fig. 17, 18, 19). Carlo Scarpa (1906-1978) conoscendo il naturale degrado del larice e la sua tendenza a ingrigirsi, sfrutta questo naturale processo per realizzare una superficie venosa capace di creare leggere sfumature di ombra su tutta la lunghezza del pannello, un effetto accentuato anche dalla lavorazione con la sega a nastro senza piallatura finale: si tratta del processo di delignificazione, dovuto principalmente al carattere fotosensibile della lignina, che gradualmente si distacca e viene trasportata via dal vento e dell'acqua.

17, 18, 19. Il padiglione sull'acqua del complesso funebre Tomba Brion a San Vito d'Altivole. Il complesso è stato progettato da Carlo Scarpa negli anni Settanta e si estende su una superficie di oltre 400 mq. È composto da diversi luoghi: l'arcosolio dove sono poste le bare dei coniugi Brion, l'edicola con le tombe dei familiari, il padiglione sull'acqua, la cappella, la sacrestia, il magazzino e i propilei. Nel 2016 sono iniziati i lavori di restauro e la prima fase è stata dedicata agli elementi in legno, utilizzati in differenti punti: rivestimento interno del soffitto dei propilei; rivestimento sarcofagi coniugi Brion, elementi di arredo nel magazzino e nella sacrestia, rivestimento interno della piramide posta sopra l'altare della cappella, rivestimento dei pannelli del padiglione sull'acqua. In quest'ultimo caso Carlo Scarpa ha realizzato tre tipologie di pannelli: i velari in compensato marino verniciati in verde, disposti nella fascia bassa; i pannelli in compensato verniciati in oro e i pannelli con doghe in larice, per la fascia superiore. In questo caso il larice non è stato trattato, il progetto infatti prevedeva il naturale degrado del materiale, con conseguente cambiamento cromatico (colore tendenzialmente grigio) e asportazione naturale del materiale della vena morbida: si crea così un naturale contrasto tra la vena morbida, più chiara e più scavata, rispetto la vena dura, più scura e più esposta. Tale processo prende il nome di lignificazione e si verifica solamente sulla superficie di un elemento a contatto con l'esterno e lascia intatta la parte interna.



3.8 Prospettive di sviluppo

La digitalizzazione in architettura è in grado di ridefinire l'intero processo progettuale, dalla progettazione all'esecuzione[65]. Nell'ambito delle costruzioni in legno, questo è stato possibile anche grazie all'introduzione di prodotti a base di legno, la cui omogeneità fisica ha consentito di realizzare elementi strutturali complessi, frutto di modelli progettuali computazionali particolarmente articolati.

La disponibilità di prodotti a base di legno omogenei e l'automazione nei processi di lavorazione materiale, svincolano il progettista dalle tradizionali imposizioni della produzione in fabbrica e aprono a grandi libertà nella definizione di:

- morfologia di ogni elemento;
- numero di elementi da realizzare;
- giunto tra gli elementi, questione di notevole rilevanza soprattutto nel caso di costruzioni a telaio.

Tutto ciò è reso possibile dall'impiego di software digitali e di strumenti quali le macchine CNC e i robot, strumenti fondamentali per l'innovazione in questo settore e che costituiscono il più alto grado di automazione: da un lato i software digitali permettono di sviluppare modelli altamente complessi, dall'altro le macchine CNC e i bracci robotici sono necessari per rispondere ai comandi digitali che vengono trasferiti attraverso i processi CAD/CAM.

La fabbricazione digitale, attraverso l'impiego di software e di macchine performanti, consente di sviluppare una nuova concezione della materia, che può essere progettata ma anche "programmata": Fabio Gramazio e Matthias Kohler introducono il concetto di *digital materiality*, cioè materialità digitale (Gramazio e Kohler, 2008), ovvero una materia che contiene dati e che può essere progettata e lavorata tramite modelli computazionali. Nella carpenteria lignea ciò si traduce nella capacità di realizzare strutture complesse per il numero degli elementi, per il genere delle lavorazioni da eseguire su di essi e per la morfologia degli elementi e dei giunti. La possibilità di controllare la produzione fino a questo grado di precisione, consente di intervenire anche su aspetti complessi quali le funzioni e le forme degli elementi strutturali. L'apparato strutturale si slega dalle forme che la tradizione costruttiva gli ha conferito, e si sviluppa attraverso elementi strutturali, frutto di innovazioni di carattere fondamentale e adattivo[66]: in alcuni casi esse sono sviluppabili solo grazie all'impiego di prodotti a base di legno, perché omogenei e quindi adatti a molteplici tipi di lavorazione, come nel caso della lavorazione del giunto di collegamento tra gli elementi del telaio del Tamedia Centre (Zurigo, 2011); in altri casi si realizzano schemi strutturali che si possono definire nuovi dal punto di vista della disposizione degli elementi e/o dei collegamenti tra le parti, come nel telaio di Gradual Assemblies (Zurigo, 2018) in cui le aste e i connettori sono disposti secondo una specifica inclinazione in risposta al modello computazionale geometrico. Infine, le nuove tecnologie hanno permesso di recuperare tecniche appartenenti alle tradizioni orientali (Cina, Corea, Giappone) e nord europee, ciò grazie all'ottimizzazione dei processi di lavorazione e soprattutto operando allo sviluppo di giunti. Si tratta di innovazioni funzionali, ovvero trasformazioni in cui le prestazioni degli strumenti di lavorazione si sono evolute al punto tale da rendere lo strumento indispensabile per la realizzazione del manufatto e la conoscenza dello strumento necessaria per lo sviluppo del progetto, come nel caso della particolare lavorazione delle travi lignee per il Maggie's Manchester, la cui

CS 01
CS 06
CS 03

varietà degli elementi strutturali avrebbe richiesto molte più ore di lavoro da parte dell'uomo, ma grazie all'impiego di una macchina CNC a 5 assi è stato possibile realizzare gli elementi necessari in tempi ridotti pur mantenendo elevato il grado di precisione.

Mettendo in relazione le possibilità concesse dalle macchine e dallo sviluppo dei prodotti in legno o a base di legno, è possibile delineare delle prospettive di sviluppo riferite ad ambiti differenti ma che interessano lo scheletro strutturale delle costruzioni:

- l'altezza, sviluppata grazie l'impiego di pannelli X-Lam;
- la personalizzazione, che si sviluppa sino a ridefinire il concetto di elemento standard;
- la gravità, che non costituisce più un ostacolo per la produzione e la messa in opera di telai complessi in cui gli spazi irraggiungibili per l'uomo sono praticabili dalle macchine.

La fabbricazione digitale ha contribuito a sviluppare la ricerca nei suddetti settori, non solo all'interno di unità di ricerca, ma anche in centri di lavoro e nelle carpenterie del territorio. Si ricorda tuttavia che "il sapere tecnico, pur in grado di offrire soluzioni progettuali alle intenzioni compositive e di indurre alcuni risultati sul piano figurativo, non può sostituire il complesso processo ideativo e creativo che è alla base del progetto stesso" (Tatano, 2006, p. 18) e che è obiettivo dell'architetto delineare e che può contribuire a definire ogni parte dell'iter progettuale, fino alla realizzazione del manufatto.

Lo sviluppo in **altezza** degli edifici in legno è una sfida recente alla quale è possibile approcciarsi grazie alle innovazioni di prodotto e alla realizzazione di giunti sempre più performanti. L'impiego del legno per costruire edifici multipiano è stato inizialmente frenato dalle normative, poiché non era prevista una regolamentazione utile all'impiego di prodotti a base di legno per altezze che superassero quelle brevettate dai prodotti certificati: nel corso degli anni, grazie anche alle prime realizzazioni sperimentali, l'impiego del legno per la realizzazione di grattacieli è diventato possibile e, anzi, è divenuto anche un affermato ambito di sviluppo per progetti e ricerche. L'impiego del legno, al confronto con altri materiali come il calcestruzzo o l'acciaio, riduce la massa del manufatto edilizio e quindi, opportunamente progettato e installato, può rispondere con più efficienza agli eventi sismici[67].Le strutture in legno hanno inoltre una buona resistenza e reazione al fuoco[68] e, soprattutto nel caso degli edifici multipiano in cui l'evacuazione richiede tempi maggiori, può costituire un importante vantaggio. Al fine di migliorare tale comportamento si possono utilizzare vernici ignifughe, cioè trattamenti superficiali utili a ritardare il processo di ignizione, oppure viene aumentata la sezione dell'elemento in legno per aumentare lo strato di materiale e quindi prolungare la durata della combustione. Si ricorda tuttavia che i trattamenti chimici possono essere vantaggiosi dal punto di vista della reazione al fuoco di un materiale, ma allo stesso tempo ne possono compromettere lo smaltimento finale: il legno naturale può essere reinserito integralmente nel ciclo di vita come fonte energetica, poiché possiede un importante potere calorifero[69], ma l'impiego di vernici e altre sostanze lo rende un rifiuto speciale.

A partire da queste considerazioni, la progettazione e la costruzione di edifici alti in legno ha recentemente subito una crescita in termini di numerosità





20, 21. Immagini delle fase costruttive del Tall Wood Building in Canada (sopra) e del Mjösa Tower in Norvegia. Nell'immagine in basso, il Tall Wood Building è la struttura della British Columbia University (Vancouver), progettata da Michael Green Architecture, attualmente la più alta al mondo (53 m). La struttura è un telaio in legno con collegamenti in acciaio, solai in pannelli X-Lam. Il core dell'edificio costituito da due elementi verticali è in cemento armato. Il Mjösa Tower a Brumunddal è in fase di costruzione e la sua inaugurazione è prevista per marzo 2019. L'edificio prevede un'altezza complessiva di 85 m, diventando così l'edificio più alto al mondo. La struttura è costituita da colonne, travi e diagonali in legno lamellare, un core in pannelli X-Lam e delle solette in CLS prefabbricato (solo per gli ultimi piani) per ridurre l'oscillazione. Seagate Structures; Moelven

e di altezza, soprattutto negli ultimi 5 anni[70]. Il Tall Wood Building, British Columbia University a Vancouver (Acton Ostry Architects, 2017), risulta oggi l'edificio in legno più alto al mondo ed è realizzato con un telaio in legno lamellare, pannelli per solai in X-Lam e un core in calcestruzzo, si sviluppa su 18 piani per 53 m di altezza (fig. 20). Edifici realizzati esclusivamente con l'impiego di legno, quindi senza un core o un basamento in calcestruzzo, sono due edifici ad uso residenziale: Forté a Melbourne (Lend Lease, 2012) e Trafalgar Place a Londra (DRMM, 2015). Sono stati entrambi realizzati esclusivamente con pannelli X-Lam, senza l'impiego di altri materiali. L'ascesa di edifici multipiano in legno, sia ad uso residenziale che di uffici, è in continua evoluzione: ad oggi sono in corso di costruzione la Mjøsa Tower a Oslo (85,4 m, 18 piani, termine previsto nel 2019, con l'impiego di solette in calcestruzzo negli ultimi 7 piani dell'edificio per ridurre le oscillazioni) (fig. 21), HoHo a Vienna (84 m, 24 piani, termine previsto entro 2018, struttura in pannelli X-Lam e core in calcestruzzo), mentre un altro progetto già approvato è il Terrace House

Anno	Città	Nome	Sistema costruttivo	Architetto	Altezza
Marzo 2019	Brumunddal, Norvegia	Mjösa Tower	Colonne, travi e diagonali in legno lamellare; core in pannelli X-Lam; solette in CLS prefabbricato per ridurre l'oscillazione	/	85,4 m 18 piani
2016	Bergen, Norvegia	Treet	Autorimessa in CA, telaio in lamellare, pannelli in X-Lam	/	49 m 14 piani
2018	Vienna	HoHo	Core in CA, elevazione in pannelli X-Lam	Rüdiger Lainer, Richard Woschitz, Alexander Kunz	84 m 24 piani
2012	Melbourne, Australia	Forte, palazzo residenziale	Pannelli in X-Lam in abete rosso	Lend Lease, UK	32,2 m 10 piani
2015	Londra	The Cube	Core in CA, telaio metallo e pannelli in legno		33 m
2017	Vancouver, Canada	Tall Wood Building, British Columbia University	Montata in soli 70 giorni. Core in CA, telaio lamellare e pannelli in X-Lam	Acton Ostry Architects	53 metri 18 piani
2015	Prince George, Canada	Wood Innovation Design Centre - WIDC	Telaio in legno lamellare, solai in X-Lam Differenti specie di legno, quali l'Abete Douglas, il cedro rosso occidentale, lo Tsuga canadensis, il pino. Struttura in X-Lam (core e solai), lamellare (pilastri e travi) e microlamellare (per le rampe scale).	Michael Green Architecture	29,2 m 8 piani
2015	Londra	Banyan Wharf	Telaio in acciaio, pannelli X-Lam, core in CA	Hawkins/Brown Architects	10 piani
2015	Trondheim, Norvegia	Moholt 50/50	Struttura composta da 5 torri, con altezze identiche. Telaio in legno lamellare, solai e scale in X-Lam	MDH Arkitekter	28 m, 9 piani
2013	Milano	Cenni di Cambiamento	/	Rossi Prodi Associati	27 m, 9 piani
2014	Stoccolma, Svezia	Strandparken	Telaio in legno lamellare, solai e scale in X-Lam. 14.000 m2 di scandole in cedro a rivestimento dei prospetti		8 piani, 25 m
2015	Jyväskylä Kuokkala, Finlandia	Puukuokka	Elemeni prefabbricati in X-Lam	OOPEAA, architect in charge Anssi Lassila	26 m, 8 piani
2019	Jesolo, Venezia	Cross Lam Tower	Pannelli X-Lam	/	12 piani
2041	Tokyo	W350	Struttura mista acciaio e legno (90% legno)	Sumitomo Forestry Co.	350 m, 70 piani
2020	Vancouver	Terrace House	Sistema misto	Shigeru Ban Architects	71 m
2016	Barangaroo NSW 2000, Australia	International House	Telaio in legno lamellare; solai e pareti in X-Lam, basamento in CA	Tzannes architects	7 piani
2018	Brisbane	25 King Tower	Telaio in legno lamellare; solai e pareti in X-Lam,	/	9 piani, 45 metri
2015	Londra	Trafalgar Place	X-Lam	DRMM	10 piani

22. Gli edifici in legno più alti al mondo: in arancio i grattacieli in fase di costruzione o progettazione esecutiva. L'edificio più alto è il Tall Wood Building, la struttura universitaria a Vancouver, progettata da Acton Ostry Architects, con un'altezza complessiva di 53 piani. Dal tipo di struttura, si può notare come la tendenza iniziale di realizzare il core in cemento armato sia stata nel corso sostituita da pannelli in legno. Per gli edifici in corso di costruzione è stata riportata la data di completamento prevista, in arancio.

a Vancouver (71 m), firmato dall'architetto Shigeru Ban, la cui realizzazione è prevista entro il 2020. Infine sono in corso di definizione alcuni progetti che ad oggi possono sembrare ancora pionieristici, come quello della società giapponese Sumitomo Forestry che prevede entro il 2040 la realizzazione di W350, la futura sede aziendale alta 350 m e realizzata interamente in legno. La tipologia strutturale più utilizzata per realizzare edifici multipiano in legno è l'X-Lam, per questioni di resistenza meccanica ma anche per praticità di montaggio; queste stesse ragioni portano ad impiegare l'X-Lam come pannello collaborante o di tamponamento per le partizioni e chiusure orizzontali in strutture a telaio in legno lamellare, come nel caso del Mjøsa Tower e del Terrace House. Molti edifici tuttavia presentano strutture in calcestruzzo, soprattutto il core dell'edificio o porzioni di elementi strutturali orizzontali, per contrastare il fenomeno dell'oscillazione al quale i grattacieli sono soggetti e che nel caso delle strutture in legno può essere più accentuato, per la leggerezza e l'elasticità della materia.



23. Burst è un modello di abitazione sperimentale, sviluppato da System Architects. Sono stati realizzati differenti modelli impiegando lo stesso principio costruttivo: tra i più noti Burst*003, realizzato a North Haven nel 2006 (in foto). Floto+Warne

Lo sviluppo **morfologico** dei prodotti a base di legno ha permesso di progettare e produrre elementi dalla forma complessa non realizzabili in legno massiccio: sia che si tratti di elementi puntuali che di elementi piani, alcune geometrie hanno richiesto una lavorazione meccanizzata tale che la mano umana non avrebbe mai potuto svilupparla senza l'impiego di software CAD-CAM e senza strumenti di grande precisione. Gli elementi piani posti in opera nell'abitazione sperimentale Burst (North Haven, 2006, System Architects) costituiscono gli il telaio portante dell'alloggio, collegati gli uni agli altri con piastre in acciaio e disposti come elementi continui sul piano e sulla parete: sono stati prodotti 1100 pannelli in compensato per realizzare la struttura, ciascuno dei quali ha una propria geometria e lunghezza (fig. 23-26). La struttura non è stata completamente chiusa: nelle chiusure verticali e superiore è stato installato un rivestimento esterno, in questo modo la struttura è leggibile all'interno dell'alloggio; mentre sulla chiusura inferiore è disposto solamente il rivestimento sull'intradosso mentre l'estradosso è lasciato visibile e accessibile, a costituire la copertura del piano terra aperto e coperto dall'alloggio. Un obiettivo del progetto è stato infatti quello di sfruttare questo spazio attraverso la dimensione degli elementi portanti, più precisamente attraverso specifici disegni geometrici. Il solaio di Burst è stato sagomato per alloggiare attrezzature sportive e ricreative per la spiaggia, come tavole da surf: l'idea è quella di sviluppare un prototipo adattabile alle differenti richieste, sfruttando i software CAD/CAM, che nel caso di questo progetto si tratta di un programma digitale importato dal settore tessile. Tramite questo software è stato possibile ottimizzare la produzione combinando i differenti elementi da tagliare sulla dimensione dei pezzi disponibili, riducendo al minimo lo scarto di produzione. Il software è stato modificato e adattato alla macchina CNC per la fresatura di pannelli in compensato. Un sistema analogo è stato utilizzato anche per il Metropol Parasol a Siviglia (2011), progettato e realizzato da Jürgen Mayer e ARUP: sebbene le estensioni siano molto differenti[71] e anche la dimensione delle strutture[72], il modello strutturale è molto simile e prevede la realizzazione di un reticolo costituito da elementi piani a base di legno collegati gli uni agli altri tramite piastre in acciaio. Entrambi i casi descrivono, su scale differenti, come la struttura possa essere efficacemente l'elemento principale del progetto e, in questo caso, essere costituita da griglie di pannelli in legno collegati tra loro attraverso elementi in metallo.







24, 25, 26. La struttura di Burst composta da pannelli in compensato, ognuno con una sagomatura differente: in tutto sono circa 1100 pannelli, assemblati l'uno all'altro con piastre in acciaio. In senso orario: all'interno la struttura verticale resta visibile e il tamponamento viene disposto esternamente; disposizione dei pannelli secondo la posizione del telaio; vista esterna dell'intradosso del solaio, i pannelli sono sagomati in funzione del collegamento strutturale e della disposizione di elementi di arredo. System Architects; Floto+Warner





27, 28. La cappella di Sain Loup, realizzata a Losanna (2008) da Local Architecture in collaborazione con Yves Weinend, ultimata e in fase di costruzione: i pannelli sono assemblati con l'impiego di profili in acciaio. Local Architecture

CS 05

Più recente è la realizzazione della struttura in pannelli in legno priva di connettori metallici del Teatro Vidy a Losanna (2017) (fig. 29), edificio progettato dall'architetto e ingegnere strutturale Yves Weinand in collaborazione con l'Atelier Cube SA. Yves Weinand è docente presso EPFL (*École Polytechnique Fédérale de Lausanne*) dal 2004 e direttore del laboratorio di ricerca sulle costruzioni in legno IBOIS in cui lavorano architetti, ingegneri, matematici e informatici. Il sistema costruttivo si basa su una doppia pannellatura inclinata, composta da X-Lam in abete dello spessore di 45 mm, tra loro connessi esclusivamente tramite un sistema di incastro legno-legno, attraverso la realizzazione di un particolare giunto a dita: lo strato dei pannelli esterni si collega con quelli interni grazie a una sagomatura particolare. L'architetto aveva sperimentato in collaborazione con lo studio Local Architecture una struttura simile per la realizzazione della cappella temporanea di Saint Loup a Losanna (2008), la cui struttura è composta da pannelli X-Lam connessi tra loro da profili angolari in metallo (fig. 27, 28).

Altri progetti sperimentali hanno mirato a definire soluzioni flessibili di giunto, come nel caso dell'ITKE Research Pavilion 2011 (fig. 30, 31) realizzato

29. Teatro Vidy, Losanna 2017, realizzato da Yves Weinand in collaborazione con l'Atelier Cube SA. Il sistema riprende quello a origami utilizzato per la Cappella di Saint Loup, ma in questo caso vengono realizzati dei giunti legno-legno attraverso un sistema di doppia pannellatura. Kramer



30, 31. ITKE Pavillion 2011, realizzato presso l'Uniersità di Stoccarda da Oliver David Krieg e Boyan Mihaylov. Il sistema costruttivo impiega sottili pannelli in compensato tra loro connessi con giunti a dita: il padiglione terminato ed esposto negli spazi universitari; fase di montaggio degli elementi scatolari preassemblati in laboratorio, le cui parti sono collegate tramite giunto a dita.





presso l'Università di Stoccarda (2011) a cura dei progettisti Oliver David Krieg e Boyan Mihaylov: il sistema costruttivo impiega sottili pannelli in compensato (6,5 mm di spessore) tra loro connessi con giunti a dita per sviluppare un giunto flessibile e non rigido, in grado di adattarsi a differenti possibili disposizioni reciproche dei pannelli. Una differente sperimentazione, volta sempre a realizzare la connessione tra elementi piani lignei attraverso una tipologia di giunto flessibile, utilizza uno strato di stoffa interposto tra quelli lignei che compongono ogni elemento piano: lo strato in stoffa permette di progettare e porre in opera una superficie frammentata e adattabile che mantiene la propria continuità (progetto di Katharina Leitner, Università di Aachen, 2000-2003).

32. Asilo nido Balena a Guastalla, Reggio Emilia 2015, progettato dall'arch. Mario Cucinella. Riferendosi alla storia di Pinocchio (Carlo Collodi, 1883), il progetto vuole ricostruire lo spazio all'interno della balena e la struttura in legno lamellare viene modellata per riprodurre l'immagine delle costole della balena. Moreno Maggi



Anche la progettazione di elementi lineari in legno lamellare offre nuove possibilità a livello formale. Nell'asilo nido La Balena (Guastalla, Reggio Emilia, 2015) la struttura del telaio è stata sviluppata per ricostruire un ambiente interno i cui elementi strutturali rimandano figurativamente alle costole della balena (fig. 32): l'edificio si estende per quasi 80 m ed è scandito da 50 portali paralleli l'uno con l'altro, composti ciascuno da tre elementi (due di elevazione verticale e uno

orizzontale) la cui morfologia varia al fine di riprodurre differenti curvature e profondità, e collegati gli uni agli altri tramite piastre in acciaio a scomparsa.

CS 07 Il Rifugio Oberholz, realizzato da Peter Pichler Architecture e Pavlov Mikolajkac, ad Obereggen (BZ) nel 2017, si colloca in un contesto geografico in cui l'impiego del legno è ampiamente diffuso e il progetto trova nello sviluppo della struttura la sua espressione architettonica, in stretta relazione con il paesaggio circostante. L'edificio è stato realizzato a quota 2096 m, e si sviluppa su due piani parzialmente incastrati sul versante della montagna: al piano superiore l'edificio si ramifica in tre elementi che escono a sbalzo per offrire al visitatore una maggiore relazione col paesaggio. La struttura di elevazione verticale del piano superiore è realizzata con portali in abete rosso, disposti con interasse variabile e inferiore ai 90 cm: la struttura è lasciata a vista e consente di vedere anche la copertura a due falde di ciascun elemento a sbalzo e la loro intersezione (fig. 33).

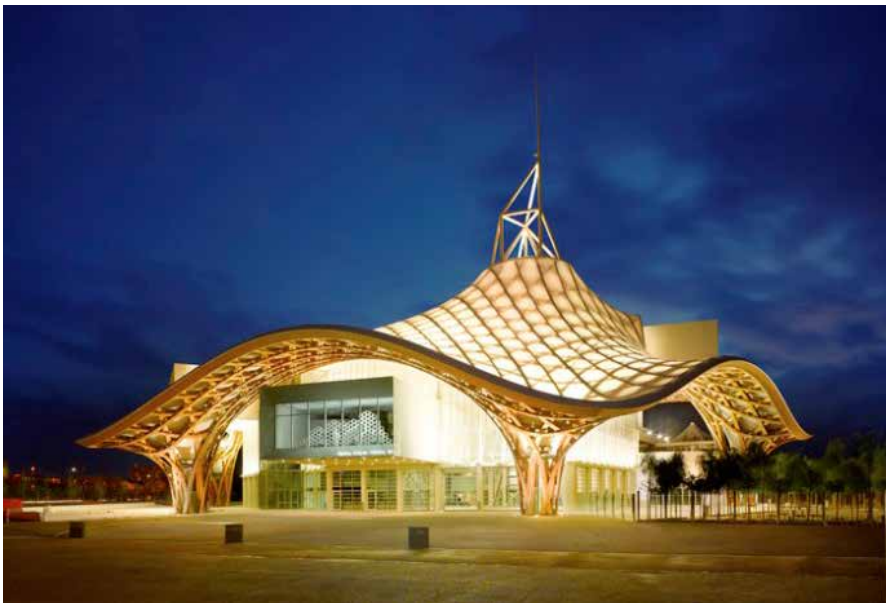


33. Rifugio Oberholz, realizzato nel 2017 a Obereggen, progetto di Peter Pichler Architecture e Pavlov Mikolajkac. La struttura dell'edificio è costituita da portali in legno che scandiscono lo spazio interno. Elektro

CS 03 In altri casi, i sistemi di automazione hanno permesso di ottimizzare l'impiego della materia prima: è il caso del Maggie's Centre di Manchester (Manchester, 2011), in cui le aste delle travi reticolari hanno sezioni variabili in funzione dello sforzo meccanico a cui sono sottoposte. Anche in questo caso la struttura è composta da portali in legno, costituiti a loro volta da un elemento di elevazione verticale, due elementi per la copertura e un elemento orizzontale a sbalzo, elementi tra loro incastrati attraverso un particolare elemento ligneo di forma triangolare. La peculiarità del progetto è la realizzazione delle aste che costituiscono l'anima delle travi reticolari a sbalzo, che variano non solo in lunghezza (poiché la trave si rastrema verso l'esterno), ma anche in sezione. Tale lavorazione ha permesso di ottimizzare l'impiego di materia prima, cioè di lamellare in abete rosso, inserendo nell'opera strutturale esclusivamente il materiale necessario. L'automazione, in questo caso, ha sfruttato le macchine CNC per superare la prassi secondo la quale tutte le aste avrebbero avuto la stessa sezione in funzione dell'asta più sollecitata, scelta che semplifica il calcolo e il disegno delle travi ma che che comporta uno spreco di materia.

L'automazione contribuisce anche a una riscoperta più generale delle tecnologie storicamente affermate nel tempo e negli ultimi secoli dimenticate, in particolar modo delle lavorazioni applicate nei sistemi di collegamento, come ad esempio incastri a coda di rondine, carrelli a tenone e mortasa. La tendenza a impiegare queste tecnologie è sempre più supportata anche dalle ricerche scientifiche, sia nello sviluppo di strutture utili al recupero di immobili storici che nella progettazione per nuove costruzioni. L'architetto Shigeru Ban in questo settore è considerato uno dei più importanti pionieri: si pensi ad esempio a due recenti sue opere come il Centre Pompidou di Metz (2010) o la Seine Musicale di Parigi (2017), in cui risalta la curvatura della struttura realizzata in legno lamellare. La struttura della copertura del Centre Pompidou è composta da circa 45 mila elementi lignei per lo sviluppo dei quali sono state definite oltre un milione di combinazioni[73] (fig. 34, 35). L'impiego di software in grado di dimensionare il modello progettuale e di riprodurlo attraverso le macchine è stato determinante, poiché l'uomo probabilmente non sarebbe stato capace di riprodurre con tale perfezione una complessità simile o, comunque, ciò avrebbe richiesto tempi estremamente più lunghi (Jeska, Pascha, 2015, p. 64). Anche per la struttura esterna della Seine Musicale sono stati utilizzati dei software per il progetto computazionale e la sua parametrizzazione in CAM, che hanno a contribuito a semplificare le operazioni di produzione e montaggio degli oltre 3300 elementi in legno lamellare, di abete e di faggio (fig. 36). Si tratta di ele-

34, 35. Il Centre Pompidou di Metz, realizzato nel 2010, progettato da Shigeru Ban in collaborazione con l'ingegnere Blumer Hermann. La struttura della copertura (dettaglio immagine sotto) in legno lamellare è composta da circa 45 mila pezzi.





36. Seine Musicale, Parigi 2017, progetto di Shigeru Ban. La struttura della facciata esterna è stata realizzata con 3300 elementi in legno lamellare, curvati e sagomati per consentire la giustapposizione degli elementi nei punti di collegamento e ottenere superfici complanari.



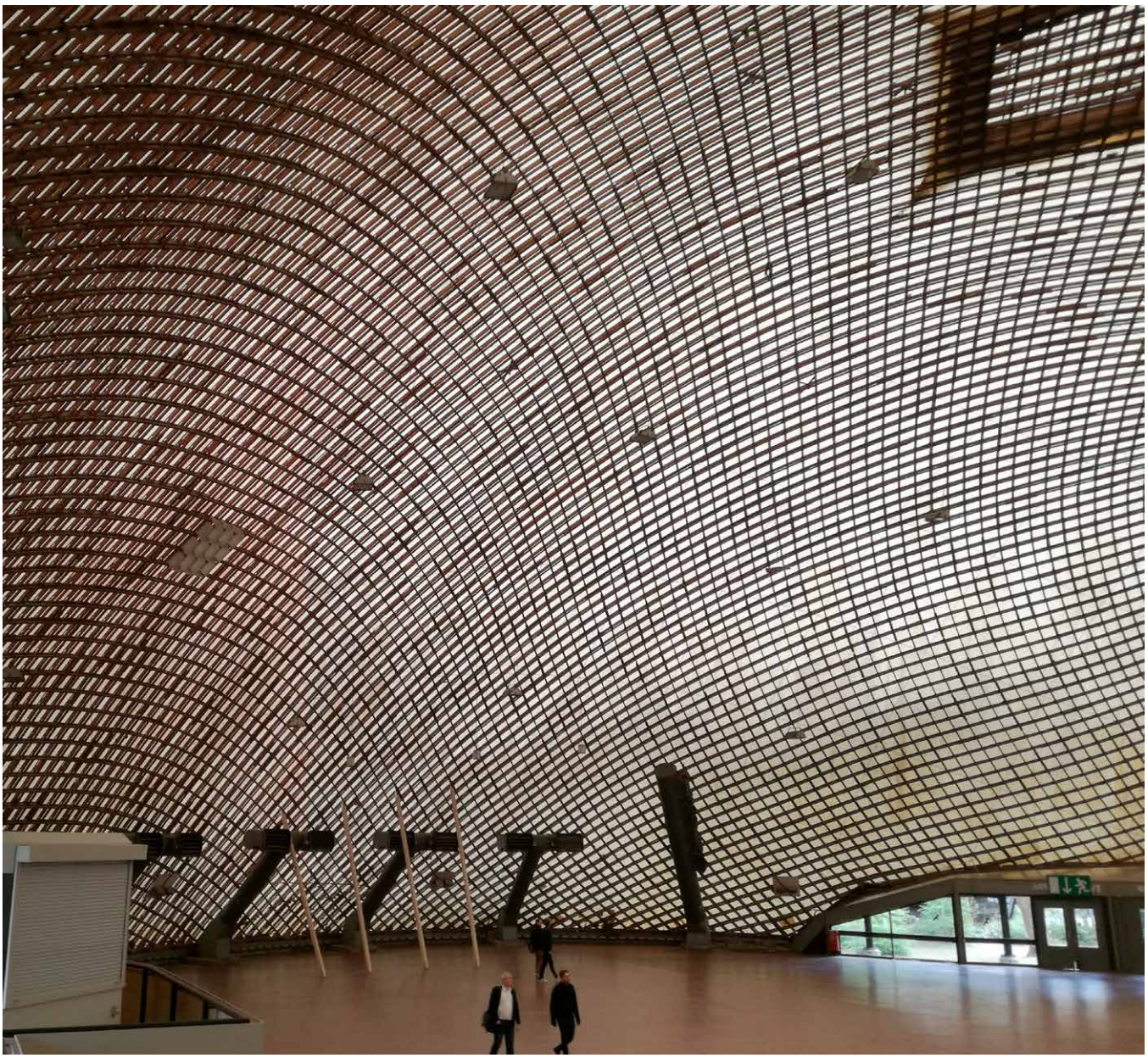
menti puntuali curvi, sagomati per disporre i collegamenti in testa e per i giunti a mezzo legno, nei punti in cui si sovrappone con altri parti. A differenza del Centre Pompidou di Metz, la superficie della struttura è complanare, non esistono cioè differenti livelli che compongono lo scheletro, ma appare come un elemento massiccio.

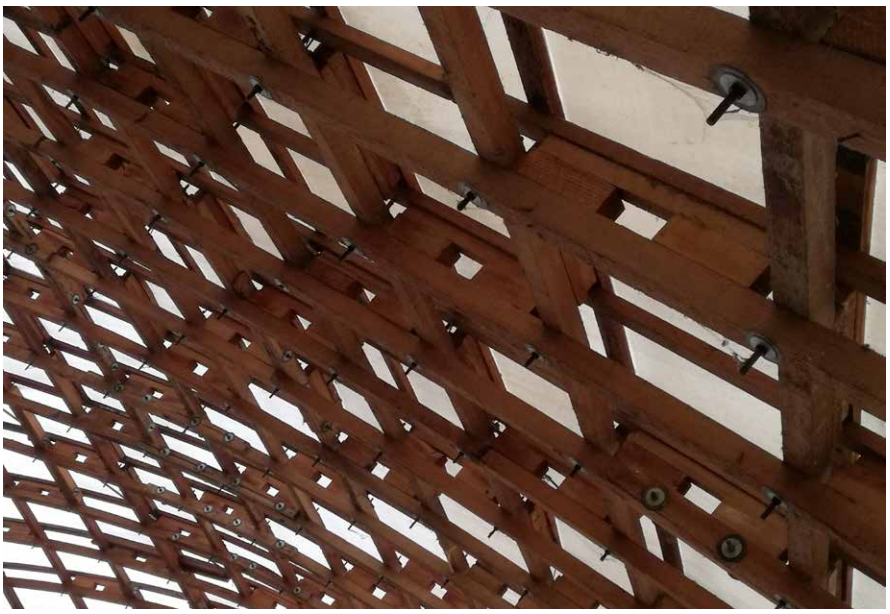
La fabbricazione digitale contribuisce allo sviluppo di nuovi modelli costruttivi, sciogliendo le complessità insite nelle fasi di **assemblaggio** tra le parti e di costruzione degli elementi, e rende quindi possibili nuove forme e nuove disposizioni per gli elementi in legno o a base legno: un materiale tradizionale si presta così a divenire uno strumento utile per lo sviluppo e la trasformazione di un linguaggio architettonico e strutturale. Ciò influisce sulla morfologia degli elementi e sul numero di parti utilizzate, come ad esempio nel caso delle *gridshell* (*grid*, cupola; *shell*, graticcio) e delle superfici a doppia curvatura, composte da numerosi elementi. Anche in questo caso, l'automazione consente di recuperare sistemi di collegamento impiegati nel passato, come quello realizzato dall'ingegnere tedesco Fritz Zollinger[74] nel 1920 per l'impiego di piccoli elementi in legno per realizzare ampie coperture in cui gli elementi non sono collegati nella mezzeria dell'asta ma sono regolarmente sfalsati. Oggi questa tipologia di collegamento è conosciuta con il nome di Zollinger e viene utilizzata con componenti in legno di dimensioni maggiori grazie all'impiego del legno lamellare e alla precisione delle macchine CNC: nel 2001 il padiglione centrale della Fiera di Rimini è stato chiuso con il sistema Zollinger e la copertura si estende su un'area ampia 60 m e lunga 100 m.

Nel campo delle *gridshell* e delle tensostrutture in legno, il più importante progettista precursore è stato l'architetto Otto Frei (1925-2015), che ha sperimentato numerosi modelli e sviluppato ampie coperture le cui superfici sono disposte in doppia curvatura, come la copertura per lo Stadio Olimpico di Monaco (1972) o il Multihall di Mannheim realizzato con gli architetti Carlfried Mutschler e Winfried Langner (1975): ancora ad oggi questa risulta essere la più estesa *gridshell* in legno al mondo, misurando circa 5600 mq (fig. 37, 38). Si può considerare la progettazione di Otto Frei come la base dell'attuale progettazione parametrica[75], sebbene egli non disponesse degli attuali modelli informatici e digitali[76].

Le sue strutture sono composte da elementi piccoli, disposti in base ad una griglia fitta che consente di utilizzare legno massiccio e non necessariamente il lamellare: questa caratteristica sembra recuperare la memoria costruttiva dell'architetto Philibert de l'Orme[77] (1514-1570) e la possibilità di coprire grandi luci combinando tanti piccoli elementi: "Una duplice serie di assi di legno sagomate, assemblate in modo sfalsato per conferire maggiore resistenza alla costruzione, creano la curva dell'arco. Ogni pezzo di legno è poi forato al centro per permettere l'inserimento delle aste che legano gli archi tra loro, queste ultime vengono, quindi, fissate alle assi tramite dei cunei, anch'essi di legno, chiamati *clefs*" (Campa, 2009, p. 101). Il motore dell'invenzione in questo caso è la volontà di realizzare coperture voltate riducendo l'uso della materia prima e grazie all'impiego di elementi di dimensione ridotta, soluzione che consente di utilizzare anche il legno che sarebbe stato scartato a causa delle sue ridotte dimensioni: il risultato è una struttura performante e leggera (Campa, 2009, p. 105).

Attraverso la ricerca e la sperimentazione in questo ambito, grazie anche al supporto della digitalizzazione e dei software, è possibile disporre in opera elementi in posizioni e in contesti impraticabili dall'uomo, ciò emerge so-





37, 38. La Multihall di Mannheim realizzata nel 1975, con la sua superficie di circa 5600 mq, è ancora oggi la più estesa gridshell in legno al mondo. Il progetto è stato realizzato da Frei Otto, in collaborazione con gli architetti Carlfried Mutschler e Winfried Langner. La struttura è composta da 4 livelli sui quali sono disposti profili in legno tra loro collegati con viti.

prattutto nella realizzazione di telai con elementi puntiformi. Nel caso di una struttura composta da pannelli, le superfici laterali degli elementi utilizzati vengono fresate secondo precise inclinazioni, consentendo così di giustapporre i pannelli nell'esatta disposizione prevista dal progetto, come nel caso precedentemente descritto del Teatro Vidy (Losanna, 2017). Gli elementi strutturali sono disposti come le pieghe di un origami, e progettati per irrigidire il sistema complessivo: ogni elemento è costituto da due pannelli in legno lamellare di abete (spessore di 45 mm) accostati con un intercapedine di 300 mm. L'inclinazione della fresatura dei bordi dei pannelli e dei giunti a pettine, crea una superficie utile in fase di montaggio e per effettuare il collegamento nella maniera corretta è sufficiente seguirne la direzione. Nel caso dei telai il montaggio può risultare più complesso e l'apporto delle macchine risulta ancor più evidente: gli elementi non sono accostati lungo un intero lato (come accade per i pannelli) ma sono collegati puntualmente, lasciando più gradi di libertà nella disposizione.

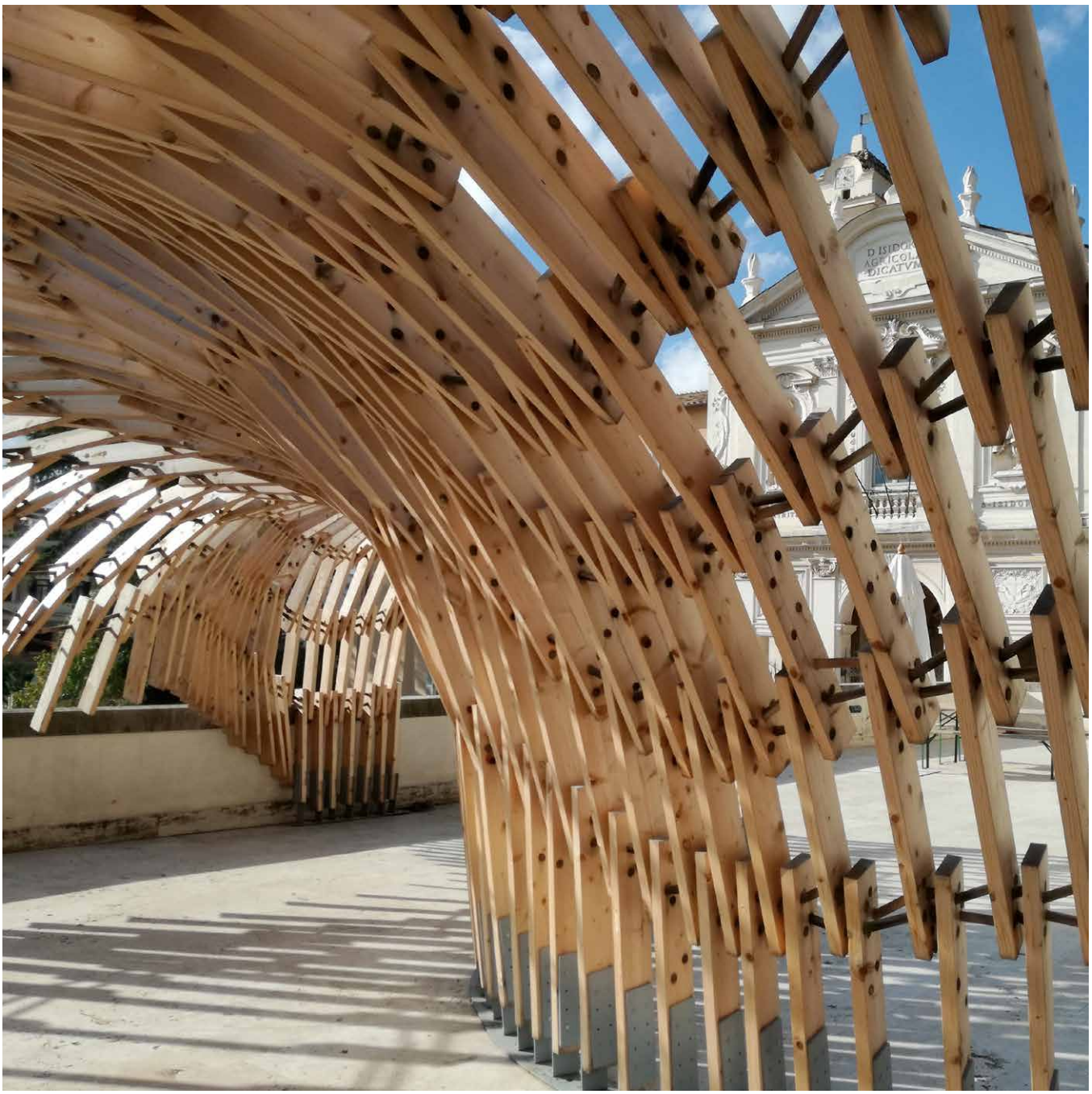
CS 05

La composizione di un telaio richiede maggiore attenzione nella fase di montaggio e il robot, opportunamente programmato, interpreta le informazioni digitali contenute nel disegno e colloca le aste nella corretta posizione. Un esempio è Gradual Assemblies 2018, un'installazione realizzata da Gramazio Kohler Research (ETH Zurigo) presso la sede dell'Istituto Svizzero di Roma, sulla terrazza di Villa Maraini (fig. 39): si tratta di una *gridshell* ottenuta grazie alla combinazione tra la progettazione computazionale e l'impiego di robot per la produzione e il montaggio. Le aste sono realizzate con piccoli elementi di identica dimensione e sono collegate le une con le altre tramite tasselli in legno. Il montaggio è frutto della collaborazione tra due bracci robotici e il lavoro dell'uomo: la disposizione dei tasselli è stata effettuata manualmente e la preforatura, che ha richiesto estrema precisione nel punto di esecuzione e soprattutto nei gradi di inclinazione del foro, è stata realizzata dai due bracci robotici[78]. Questa costruzione testimonia un passaggio molto importante nell'evoluzione delle tecnologie e nell'interazione uomo-macchina: il braccio robotico non si limita esclusivamente a movimentare i pezzi in uno spazio georeferenziato[79], ma interviene su di essi, collaborando con altri robot e con l'uomo. La costruzione di telai leggeri completamente in legno è ancora in fase di sviluppo; sono invece più diffusi i telai in legno lamellare che prevedono un numero di aste ridotto ed elementi di sezione maggiore, che risultano utili anche per la messa in opera degli elementi di rivestimento, come nel caso del Tamedia Centre (Zurigo, 2011) i cui portali in legno hanno pilastri con una sezione pari a 440x440 mm.

CS 06

CS 01

Sono allo studio anche *gridshell* realizzate con elementi piani in legno piegati. Questi pannelli sfruttano la tensione della curvatura che, insieme alla morfologia del pannello, diviene il principio alla base dello sviluppo progettuale (Jeska, Pascha, 2015, p. 80). Si possono distinguere diversi sistemi di assemblaggio, determinati dal metodo di connessione impiegato (l'utilizzo di connettori esterni o la modellazione del giunto sull'elemento ligneo) e dalla tipologia di elementi (se tutti identici tra loro oppure differenti). Nel 2010 sono stati realizzati due padiglioni con questo sistema costruttivo, uno al Politecnico di Losanna e l'altro all'Università di Stoccarda. Il primo progetto è Timberfabric di Markus Hudert, eseguito presso il laboratorio di ricerca IBOIS dell'EPFL di Losanna: attraverso l'impiego di pannelli tutti uguali tra loro viene sviluppato il cosiddetto *Textile Module*, ovvero un modulo a forma



39. Gradual Assemblies, Villa Maraini Roma, 2018. Il progetto sviluppato all'interno del Master of Advanced Studies in Architecture and Digital Fabrication, Gramazio Kohler Research ETH Zurigo. I collegamenti tra le aste sono realizzati senza l'impiego di connettori metallici.

di arco in cui i pannelli curvati sono tenuti in tensione tramite la connessione rigida realizzata con connettori metallici. Il secondo, ICD/ITKE Research Pavilion 2010, è firmato da un team di progettisti[80] e impiega pannelli in compensato di betulla modellati al fine di realizzare i collegamenti ad incastro che consentono la realizzazione di fasce lunghe fino 10 m: la costruzione non è realizzata con elementi uguali tra loro ma con pannelli sui quali sono state eseguite lavorazioni *ad hoc* che differenziano e rendono unico ciascun elemento portante della struttura. Un'installazione dalla concezione similare, realizzata nel 2012 presso il Kowloon Park di Hong Kong, è il *Dragon Skin Pavilion*: il progetto[81] prevede l'impiego di elementi piani uguali, curvati, fresati e incastrati tra loro. Gli elementi posti in opera sono piccoli e unici, differiscono tra loro per la fresatura, eseguita a differenti profondità e in funzione dell'accostamento e della giunzione tra i pannelli.

3.9 Headmade

La fabbricazione digitale, intesa come processo di progettazione e produzione in cui la materia può essere progettata e programmata attraverso l'impiego di software e strumenti digitali come i robot, può contribuire a riportare la produzione a una dimensione artigianale, intensa come processo di stretta interazione con la materia. Se la digitalizzazione permette di andare oltre la produzione seriale e rende possibile la produzione di prodotti unici, il progetto di un edificio e delle singole parti che lo compongono può liberarsi dal vincolo di replicabilità imposto dall'industrializzazione edilizia che non sempre conosce le potenzialità di software e robot. La digitalizzazione contribuisce al contempo a dare spazio al progetto e allo sviluppo di un'interazione diretta tra cliente e azienda, in una forma di produzione in cui il cliente definisce il proprio prodotto sulla base di variabili proposte dall'azienda stessa mentre il ruolo del progettista, inteso come interprete e traduttore dei bisogni dell'individuo, può essere quasi del tutto annullato[82].

La digitalizzazione definisce quindi due possibilità estremamente lontane l'una dall'altra, in cui il ruolo della progettazione perde valore, oppure in cui diventa l'elemento chiave della produzione. La tesi si basa sulla definizione di questo secondo scenario in cui la digitalizzazione, attraverso l'automazione, contribuirà alla trasformazione della progettazione e della produzione: "La robotizzazione delle macchine utensili, consentendo di realizzare serie di componenti variate nelle loro caratteristiche morfologiche e dimensionali, mina infatti alla base il concetto di standard spesso indicato come causa principale dei modesti risultati architettonici ottenuti con le prime esperienze di prefabbricazione. La possibilità di disporre di componenti prodotti industrialmente, eppure diversi gli uni dagli altri, consente di recuperare quella profonda relazione tra le tecniche di produzione dei componenti di una costruzione e le tecniche utilizzate per il loro assemblaggio che fino alla prima età della macchina appartenevano alla medesima cultura materiale e coincidevano con il cantiere" (Nardi, 1992).

L'industria e l'artigianato cambiano, dando luogo a nuove forme di produzione in cui è il progetto architettonico e tecnologico ad assumere valore, come prefigurato dal Bauhaus nel primo Novecento il cui obiettivo era formare "nuovi collaboratori rivolti a un settore produttivo in cui industria e artigianato sono sempre più vicini" (Gropius, 1927)[83]. L'automazione ibrida industria e artigianato, portando la cultura materiale tipica dell'artigiano alla dimensione industriale, che non è più replicatore di elementi standard ma diviene replicatore di qualità, in cui ciò che viene eseguito ripetutamente non è la lavorazione di un medesimo prodotto, ma la variabilità dei gesti produttivi volti a rispondere ai differenti progetti tecnologici. Parallelamente, l'artigianato viene sdoganato dal vincolo del lavoro manuale e incardina il proprio valore sulla capacità di dominare il dialogo fra azione e riflessione (Micelli, 2011), valorizzando l'idea del progetto attraverso la ricerca e lo sviluppo degli stessi strumenti da lavoro. L'impiego di nuovi strumenti corrisponde a un'evoluzione del gesto produttivo: il gesto viene delocalizzato attraverso la meccanizzazione e il gesto dell'uomo si trasforma nel gesto della macchina utensile (Picon, 1988); l'automazione non trasforma solamente il gesto di lavorazione, ma ridefinisce l'intero processo sottolineando il valore dell'idea.

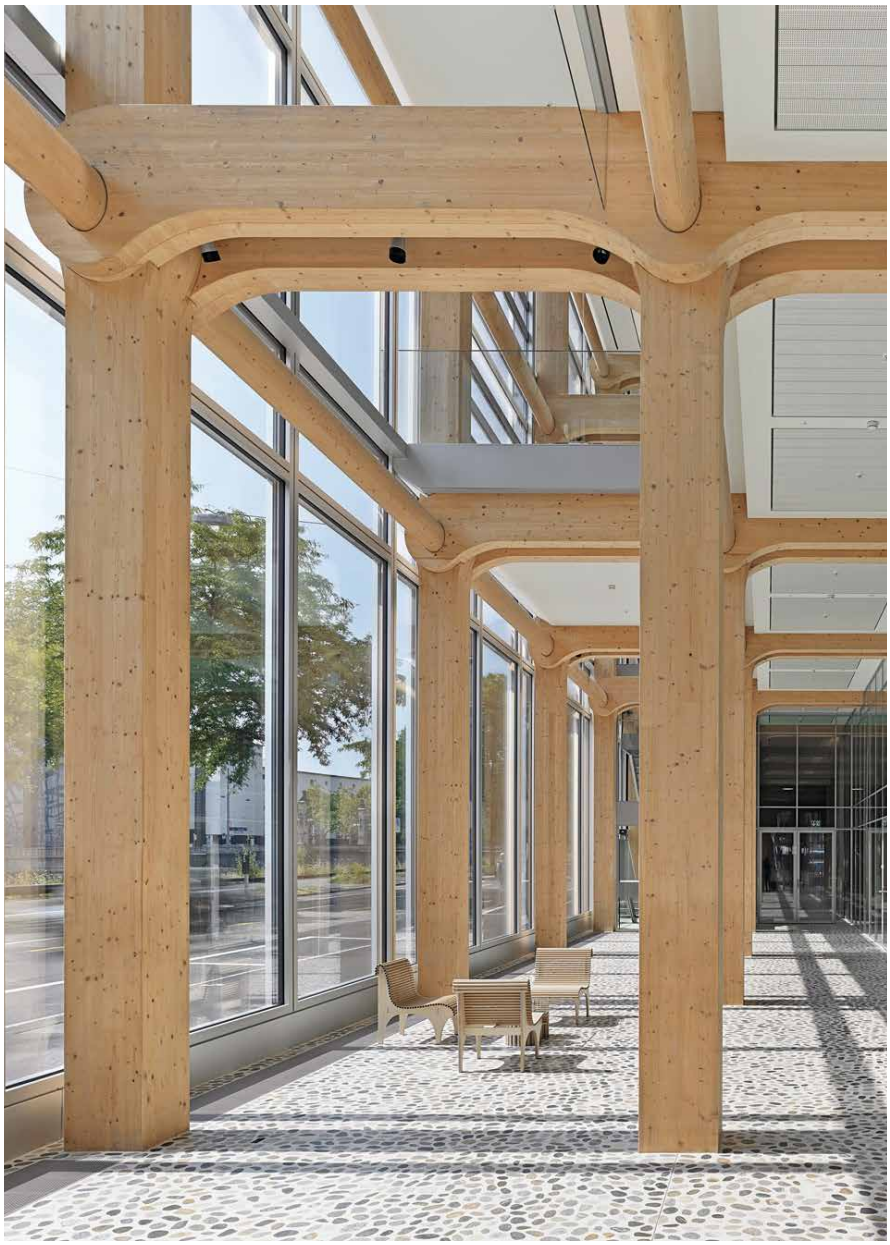
Ragionare in merito all'automazione non significa ipotizzare la fine dell'in-

dustria e il ritorno dell'artigianato, ma prefigurare una possibile rielaborazione e riproposizione dei saperi e dei valori artigiani: in tale rielaborazione il progettista stesso è portato a guardare il passato con "nostalgia costruttiva" (Picon, 2017)[84], atteggiamento che si esprime nella capacità di interpretare il passato e la tradizione senza volerli riprodurre o emulare, bensì con l'obiettivo di espanderli attraverso lo studio continuo dei materiali, delle tecniche di lavorazione e delle tensioni strutturali, che contribuiscono a dare forma all'architettura. Lo studio di questi principi permette all'uomo, in qualità di progettista, di slegarsi dai canoni di produzione imposti dal mercato e di progettare la produzione stessa in funzione quindi della qualità architettonica.

L'automazione può quindi contribuire a riavvicinare la progettazione e la produzione richiamando l'approccio dell'artigiano e sviluppando i principi progettuali che sono insiti nella materia del prodotto, materia che oggi può essere progettata grazie all'informatizzazione e all'automazione a disposizione. Allo stesso modo, cambia lo strumento per la lavorazione materiale[85] che non è più necessariamente mosso da un gesto manuale, ma anche robotico, frutto di un'automazione. Il valore finale del prodotto varia non in termini di valore assoluto ma in relazione al significato e al contenuto del valore stesso: il lavoro artigianale ancora oggi è inteso come un processo basato sul lavoro manuale e il valore finale del prodotto racchiude anche il gesto umano, oltre che al valore della materia. Con il termine *craft* si indica un processo di produzione esclusivamente fatto a mano, e l'attività dell'artigiano viene infatti tradotta con la parola *handicraft*, in cui il termine *hand*, quindi mano, si fa ancora più esplicito perché si vuole contraddistinguere una lavorazione differente da quella industriale (e seriale), eseguita con le macchine in maniera ripetitiva. Un prodotto realizzato a mano è considerato un prodotto di valore: nel settore edilizio ad esempio si può pensare al pregio di alcuni prodotti utilizzati per il rivestimento, considerati di lusso per la lavorazione esclusivamente manuale[87] e per la preziosità dei materiali; oppure a componenti strutturali realizzate *ad hoc*, che hanno richiesto specifiche operazioni di produzione e montaggio non consoni ai sistemi costruttivi standard[86], come l'impiego di blocchi in laterizio o di laminati in metallo. L'impiego dell'automazione slega il valore finale del prodotto dal gesto umano e lo riconduce a un processo di lavorazione neutro, ovvero ad una lavorazione che può essere eseguita da una mano oppure da un robot, perché ciò che più inciderà sul valore finale del prodotto sarà l'idea, che quindi determinerà anche buona parte della qualità del prodotto. Avviene dunque uno spostamento del valore finale del bene in questione, che passa dal costo materiale e di lavorazione, al lavoro di ideazione, progettazione e programmazione (Micelli, 2011).

In virtù di tale considerazione, a partire dal dialogo fra azione e riflessione (che contraddistingue l'artigianato e che non è più esclusivamente rivolto a un lavoro manuale), la tesi definisce *headmade* ciò che è di valore perché è prima di tutto ideato, perché è fatto con la testa (*head*). *Headmade* non è un prodotto necessariamente frutto di un gesto umano ma è certamente l'esito dell'applicazione e dell'ingegno del progettista: nella dimensione artigianale, si distingue quindi *headmade* da *handmade*, in quanto il secondo termine fa riferimento al ruolo della mano all'interno del processo produttivo e non esplicita pienamente il valore che hanno la progettazione e l'ideazione all'interno del processo.

Il valore del concetto di *headmade* si esplicita e si concretizza se collocato all'interno dei processi di progettazione in senso più ampio, cioè nei processi della progettazione degli elementi costruttivi e dei componenti edilizi fino alla



40. Tamedia Centre, Zurigo 2013, progettato da Shigeru Ban. Il sistema costruttivo è stata sviluppato in collaborazione con l'ing. Blumer Hermann, con cui aveva precedentemente collaborato. Il telaio in legno lamellare, alto oltre 21 m, è formato da elementi tra loro collegati senza l'impiego di metallo, ma attraverso l'impiego di un giunto legno-legno utilizzato per mobili.

scala dell'edificio e del costruito, e non se riferito strettamente alla dimensione dell'artigianato come spesso lo si intende. Allo stesso tempo, *headmade* è forte delle capacità degli artigiani che sanno lavorare con la materia e riconoscere gli strumenti più appropriati per eseguire ogni determinata operazione. La progettazione dell'idea trova rinnovato vigore nel processo produttivo dell'architettura e, attraverso la robotica, "le relative conoscenze dei materiali - a volte perse nell'era digitale - ora riemergono con sicurezza con un incontro evocativo, variegato e tangibile. Questa enfasi sulla progettazione costruttiva e la fabbricazione meccanica rafforza radicalmente un nuovo modo di pensarli e di materializzare l'architettura" (Gramazio e Kohler, 2014, p. 20).

Il ritorno alla sfera artigianale, intesa come stretta interazione con la materia e riappropriazione di una cultura materiale, è stato discusso da Guido Nardi con la pubblicazione "Le nuove radici antiche" (1994) in cui, già attraverso l'ossimoro del titolo, egli richiama la capacità del progettista nel ridefinire il valore della tecnica all'interno del processo architettonico, e quindi il valore dell'architettura stessa. La padronanza della materia è alla base di ciascuna tecnica, alla quale non

resta che svelare le proprietà della natura dal momento che non le può dominare (Galimberti, 2016, p.475). Per questo motivo, nel caso della carpenteria lignea, l'*headmade* si fonda prima di tutto sullo studio delle proprietà e della natura del legno e dei prodotti a base di legno: essi sono la materia attraverso la quale prende forma l'idea.

Il Tamedia Centre di Zurigo, realizzato nel 2013 e progettato dall'architetto Shigeru Ban, incorpora il valore di *headmade* nella struttura portante in legno: le aste e i giunti del telaio sono stati progettati prendendo spunto da sistemi di collegamento impiegati nella tradizionale carpenteria giapponese, che prevede l'impiego di pioli tra travi e pilastri. Il Tamedia impiega i sistemi di collegamento antichi ingigantendoli e applicandoli agli elementi strutturali (la sezione del pilastro in legno lamellare è pari a 44x44 cm, sovradimensionato anche per migliorare la resistenza al fuoco dell'elemento). Shigeru Ban, architetto giapponese e vincitore del Premio Pritzker nel 2014, è conosciuto per la ricerca della sostenibilità attraverso la scelta dei materiali e dei sistemi costruttivi; egli ha progettato la struttura in legno per definire e determinare l'intero progetto, ne esalta le parti, la tipologia di giunto legno-legno, la scelta delle specie di legno per gli elementi strutturali (lamellare in abete rosso) e per il piolo (compensato di faggio), la morfologia degli elementi strutturali (sagoma tonda della testa delle travi, sezione ovale delle traverse). La struttura è concepita per realizzare un edificio impiegando esclusivamente il legno, per ridurre al minimo le lavorazioni in cantiere, per fare della struttura (attraverso i suoi collegamenti) l'architettura dell'edificio (fig. 40). *Headmade* è riconoscibile proprio nella capacità di utilizzare la cultura materiale per definire l'essenza del progetto: la tecnica artigianale giapponese è stata compresa, ripensata e rielaborata con le tecnologie più avanzate al fine di realizzare con una precisione millimetrica ogni parte dell'architettura, dai doppi pilastri lunghi 21 m, alla sagomatura *ad hoc* dei giunti in faggio e degli ovali di collegamento, fino a poterne definire le sequenze di montaggio in opera, nell'ottica di realizzare una struttura completamente smontabile.

CS 01

Il valore di *headmade* non si limita alla morfologia degli elementi e all'elaborazione dei giunti, riguarda anche la concezione spaziale e quindi il montaggio degli edifici: lo schema strutturale viene definito attraverso l'impiego di modelli computazionali, che solamente i robot sono in grado di sviluppare con un grado di precisione estremo e in modo istantaneo. La macchina opera laddove le capacità fisiche dell'uomo, intese come la forza per spostare gli elementi o la vista per riconoscere la segnaletica per il montaggio, non sono più sufficienti (o necessarie): l'uomo afferma il proprio ruolo nello sviluppo del progetto attraverso il suo ingegno. Caso esemplificativo è il Gradual assemblies progettato e realizzato all'interno del Master di studi avanzati in architettura e fabbricazione digitale dell'unità di ricerca Gramazio Kohler Research. Il padiglione è stato installato sulla terrazza dell'Istituto Svizzero di Roma nel luglio 2018, ma le attività di progettazione e modellazione sono state portate a termine nei mesi precedenti presso il Laboratorio di Fabbricazione Robotica dell'ETH di Zurigo. La struttura è composta da oltre 700 doghe in larice di identica dimensione e da oltre 2700 tasselli. Questi tasselli sono presumibilmente realizzati in faggio, per sfruttare e ottimizzare la dilatazione del legno una volta posto in opera (la dilatazione del tassello irrigidisce il giunto). La struttura è stata elaborata come una *gridshell*, in cui la parte che conferisce l'orientamento delle singole doghe non è l'elemento di giunzione ma è la direzione della foratura che è stata realizzata sulle doghe per l'alloggiamento del connettore. Modellare la foratura dei giun-

CS 06

ti[88] è un'operazione che poteva essere eseguita solamente da uno strumento in grado di leggere due valori determinanti: la posizione della foratura rispetto alla doga e la posizione della doga rispetto l'intera struttura[89]. Tale operazione è stata svolta presso il Laboratorio di Fabbricazione Robotica dell'ETH di Zurigo impiegando di due bracci robotici, uno per la foratura e l'altro per la disposizione delle doghe: entrambi i bracci hanno operato nello spazio tridimensionale senza l'impiego di riferimenti visivi, che sarebbero invece stati necessari per l'uomo, essi hanno utilizzato come mappa e guida dei loro movimenti il modello informatico che era stato elaborato per controllare lo sviluppo del padiglione. La concezione strutturale del Gradual assemblies è diretta conseguenza dello studio delle proprietà della materia prima, le differenti specie di legno, quali il larice e il faggio, e dell'impiego dell'automazione nel processo costruttivo, determinante per la disposizione delle doghe e la corretta foratura per l'inserimento dei tasselli, determinandone il montaggio complessivo.

L'automazione, attraverso la robotica e la progettazione computazionale, sta contribuendo a ridefinire ruoli e responsabilità degli attori del processo progettuale e, proprio per questo motivo, non può essere ignorata: "Non ricaveremo del bene dall'automazione se ci limiteremo a lasciar andare le cose per il loro corso. Spetta a noi scoprire quali siano le condizioni in cui le nostre nuove energie potranno portare ad un aumento di felicità ed assolvere poi i nostri compiti nell'assicurare che tali condizioni si realizzino" (Lilley, 1957).

L'*headmade* è l'insieme delle competenze e dei saperi con cui si governa la materia attraverso un mezzo, che è la "nuova tecnica", definita come utensile da lavoro e capacità di programmazione digitale di tale utensile. La nuova tecnica diviene lo strumento con cui l'uomo può interagire in modo diretto con la materia, la quale si svincola dalla produzione standardizzata per rispondere al progetto dell'architetto. Tale considerazione risalta un approccio differente rispetto alla tecnica più tradizionalmente intesa come "universo dei mezzi che lavora prescindendo da qualsiasi fine" (Galimberti, 2016, p.684). La nuova tecnica racchiude in sé il potenziale programmabile (attraverso la dimensione digitale) per definire la qualità architettonica e quindi la capacità di rispondere in maniera più puntuale ai bisogni della società. Resta tuttavia il rischio di "spostare l'attenzione sulla preparazione dei mezzi, dalla cui maggior disponibilità dipende la realizzazione dei fini. […] I fini non sono più una scelta discrezionale della volontà a partire dai quali si va alla ricerca dei mezzi, ma piuttosto essi sono il prodotto meccanicistico dell'estensione dei mezzi che generano la disponibilità dei fini" (Galimberti, 2016, p. 341). La nuova tecnica, attraverso l'impiego dell'automazione, può riportare la scelta e i bisogni al centro del progetto, come valore determinante dei fini e quindi anche dei mezzi: l'automazione tuttavia rappresenta solamente uno strumento per l'ingegno dell'uomo, e non costituisce la soluzione. La tecnologia è un mezzo attraverso il quale l'ingegno definisce le intenzionalità della tecnica e della materia e, nel caso della progettazione architettonica, rappresenta l'atto costruttivo, ovvero "l'insieme di tutte le operazioni che intercorrono fra l'ideazione e la realizzazione di un edificio e, in particolare […] gli elementi costruttivi e il loro processo d'assemblaggio" (Nardi 1992, p. 17), costituisce la mediazione tra fini e mezzi, e quindi capace di valutare l'appropriato ruolo delle tecnologie più avanzate come i robot, in funzione dell'*headmade* e dei bisogni della società e non alla mera disponibilità dei mezzi.

L'*headmade* non ha come fine ultimo la progettazione di strumenti poiché il

loro ruolo è solamente quello di raggiungere i fini dettati dal progetto architettonico. L'attenzione va posta non tanto sul mezzo fisico attraverso il quale si produce, ma sull'azione del produrre e sul valore culturale della materia: se la produzione è la riflessione della natura dell'uomo, *homo faber*, allora la fabbricazione delle macchine in quantità imprevedibili "non è ancora una prova che l'attività che mette al mondo questi prodotti (o meglio: senza la quale questi prodotti non verrebbero al mondo) rappresenta un vero e proprio *facere*, un vero e proprio fabbricare. È piuttosto il contrario" (Anders, 2018, p. 59).

La quantità di prodotti è cresciuta, ma non si possono più definire come prodotti comportamentali, in cui l'uomo non sempre riconosce la propria identità come lavoratore e la propria identità culturale. Tuttavia è anche attraverso la cultura materiale che l'uomo sviluppa la propria identità culturale: "I materiali hanno una storia, emergono nelle lavorazioni, vengono di moda, tramontano, mentre altri emergono e caratterizzano epoche di civiltà, stili di un cultura. Vi è una cultura del mattone, come ve n'è una del ferro e del cemento armato. E ciascuna materia, se viene vissuta soggettivamente in una certa polarizzazione psicologica individuale, fa anche parte di un tessuto collettivo e instaura, per il tempo in cui sale a dominante culturale, tutto un suo orizzonte di gusto e di stile" (Formaggio, 1981, p. 127). Pertanto la cultura materiale non va intesa come un valore assoluto ed eterno: è un valore mutabile, che rispecchia i valori di una società, in un'epoca, in una sua collocazione geografica.

Quello che oggi le nuove tecnologie possono offrire è la possibilità di sviluppare un nuovo legame con la materia, a partire anche da quanto sostenuto da Günther Anders (1902-1992) con il concetto di "dislivello prometeico" (1992): secondo il filosofo tedesco infatti esiste una distanza tra la capacità dell'uomo di immaginare e la capacità di produrre[90], quest'ultima spinta anche dall'evoluzione tecnica e dall'impiego di tecnologie sempre più avanzate, che contribuiscono ad aumentare sempre più questa distanza. La produzione è illimitata e tanto espandibile che l'uomo non può neppure immaginarlo: e così, mentre la capacità di previsione umana è finita, la produzione è potenzialmente infinita. Tale potenziale cresce con la disponibilità dei mezzi, quindi anche attraverso la robotica e l'automazione. Anders ritiene infine che quella "differenza tra rappresentare e produrre [il dislivello prometeico], si realizza, dato che il produttore non ha più nulla a che fare col prodotto, già all'interno dello stesso processo di produzione" (Anders, 2015, p.59). Egli sostiene che la macchina realizzi non solo prodotti in quantità imprevedibili, ma soprattutto estranei al comportamento umano, e che condizioni inevitabilmente lo status dell'uomo: "In realtà, il tipo dell'operaio automatizzato è assolutamente nuovo. Benché lavori solitario come un ciabattino, egli non tiene mai in mano un prodotto, per non parlare di un suo proprio prodotto, piuttosto si limita a osservare i segnali del processo che si svolge senza di lui. E benché stia qui seduto senza fare fatica, come uno che scrive libri, non per questo egli è promosso al ruolo di lavoratore intellettuale, ma unicamente a quello di poliziotto della macchina, un poliziotto il cui lavoro consiste nella speranza di non dover arrestare nulla e nessuno" (Anders, 1992, p. 407). Questa visione però può essere superata caricando l'*headmade* del valore che ha una nuova tecnica con cui è possibile costruire una stretta interazione tra l'uomo e la macchina, quindi tra l'uomo e la produzione, riavvicinandolo alla natura della materia e contribuendo a recuperare la propria identità primitiva, con la consapevolezza dei propri limiti e le potenzialità offerte dall'automazione.

I CASI STUDIO

		ANNO	PROGETTAZIONE	CARPENTERIA
CS 01	**TAMEDIA CENTRE Zurigo, Svizzera**	2013	Shigeru Ban Architects	Blumer Lehamann Collaborazione ●●●●
CS 02	**ASILO NIDO LA BALENA Guastalla, Reggio Emilia**	2015	Mario Cucinella Architects MCA	Rubner Holzbau Collaborazione ●●●●
CS 03	**MAGGIE'S MANCHESTER Manchester, United Kingdom**	2016	Foster + Partners	Blumer Lehamann Collaborazione ●●●●
CS 04	**SEQUENTIAL ROOF ITA - Istituto di tecnologia in architettura Zurigo, Svizzera**	2016	Gramazio Kohler Research	ERNE AG Collaborazione ●●●●
CS 05	**PADIGLIONE VIDY Losanna, Svizzera**	2017	Yves Weinend, Atelier Cube SA	Blumer Lehamann Collaborazione ●●●●
CS 06	**GRADUAL ASSEMBLIES Villa Maraini, Roma, Italia**	2018	Gramazio Kohler Reserach	/ Collaborazione ●●●●
CS 07	**RIFUGIO OBERHOLZ Obereggen (BZ), Italia**	2017	Peter Pichler Architecture e Pavlov Mikolajkac	Ligno Alp Collaborazione ●●●●

Le carpenterie hanno collaborato nella produzione e nella progettazione dei componenti lignei. In alcuni casi le aziende hanno partecipato fin dalle prime fasi del progetto, con la propria esperienza nel settore e con l'organizzazione e la programmazione degli strumenti di lavoro, quali CNC e robot e software per l'elaborazione dati. Questo grado di partecipazione è stato espresso con un valore compreso da 0 a 4 con pallini di colore arancio.

Nella tabella sono stati riportati i principali aspetti dei casi studio analizzati: oltre alle informazioni base quali il luogo e l'anno di realizzazione e lo studio di progettazione, sono state poste in evidenza le carpenterie di riferimento e la collaborazione con enti di ricerca, quali laboratori o unità di ricerca. In relazione alla struttura, la tabella descrive la tipologia degli elementi e dei giunti, i prodotti in legno o a base di legno utilizzati, l'impiego dell'automazione nei processi di progettazione, produzione e montaggio, sia riferiti alla struttura complessiva che al caso specifico dei giunti. I dati sono stati successivamente elaborati in grafici (nelle pagine seguenti), risaltando i processi in cui è maggiormente impiegata l'automazione e individuando le relazioni tra automazione, collaborazione con carpenterie ed enti di ricerca.

COLLABORAZIONE CON ENTE DI RICERCA	STRUTTURA	IMPIEGO DELL'AUTOMAZIONE	GIUNTI
/	Telaio: lamellare di abete e multistrato di faggio	Modellazione ● ● ○ ○ Lavorazione ● ● ● ○ Montaggio ○ ○ ○ ○	Giunti legno-legno, tipologia tenone-mortasa Complessità ● ● ● ●
/	Telaio: lamellare di abete	Modellazione ● ● ● ○ Lavorazione ● ● ○ ○ Montaggio ○ ○ ○ ○	Incastri e cerniere con piatti in metallo Complessità ● ○ ○ ○
/	Telaio: LVL di abete	Modellazione ● ● ● ○ Lavorazione ● ● ● ● Montaggio ○ ○ ○ ○	Incastri e cerniere con piatti in metallo Complessità ● ● ● ●
Gramazio Kohler Research, ETH Zurigo	Travi reticolari: abete	Modellazione ● ● ● ● Lavorazione ● ● ● ● Montaggio ● ● ● ●	Chiodi Complessità ● ● ○ ○
IBOIS, EPFL Losanna	Pannelli: Cross Lam di abete	Modellazione ● ● ● ● Lavorazione ● ● ● ● Montaggio ● ○ ○ ○	Giunti legno-legno (tipologia tenone-mortasa) Complessità ● ● ● ●
Gramazio Kolher Research, ETH Zurigo	Gridshell: aste in abete	Modellazione ● ● ● ● Lavorazione ● ● ● ○ Montaggio ● ● ● ●	Giunti legno-legno (tasselli in faggio) Complessità ● ● ● ○
/	Telaio: lamellare di abete	Modellazione ● ● ● ● Lavorazione ● ● ○ ○ Montaggio ○ ○ ○ ○	Incastri e cerniere con piatti in metallo Complessità ● ○ ○ ○

Con ente di ricerca si fa riferimento a laboratori o unità di ricerca, in questi casi tutti appartenenti a università. La collaborazione con enti di ricerca ha permesso di condurre sperimentazioni sui sistemi di lavorazione e assemblaggio, oltre che a tutte le prove meccaniche necessarie per la messa in opera.

Tipologia di struttura utilizzata e principale materiale impiegato per la realizzazione dei componenti.

L'automazione nelle differenti fasi del processo, impiegata per la realizzazione degli elementi strutturali. Sono state distinte tre differenti fasi: la modellazione, la produzione e lavorazione materiale, il montaggio e la movimentazione dei pezzi. Per ciascuna di esse è stato espresso un valore compreso da 0 a 4 sull'impiego dell'automazione all'interno dei processi:

- ○ ○ ○ ○ nessuno
- ● ○ ○ ○ minimo
- ● ● ○ ○ ridotto
- ● ● ● ○ parziale
- ● ● ● ● impiego fin dalle prime fasi del processo

Tipologia di giunti realizzati e impiego di altri materiali per la loro realizzazione, quali connettori metallici.
Valutazione della complessità del giunto in relazione all'impiego dell'automazione, quindi di strumenti come CNC e bracci robotici per la lavorazione del materiale, la disposizione dei connettori, il montaggio delle parti, contribuendo allo sviluppo di un giunto progettato ad hoc. La complessità è stata espressa con un valore compreso da 0 a 4:

- ○ ○ ○ ○ nessuno
- ● ○ ○ ○ minimo
- ● ● ○ ○ ridotto
- ● ● ● ○ parziale
- ● ● ● ● impiego dell'automazione per la lavorazione materiale, la disposizione dei connettori, il montaggio delle parti

modello del diagramma

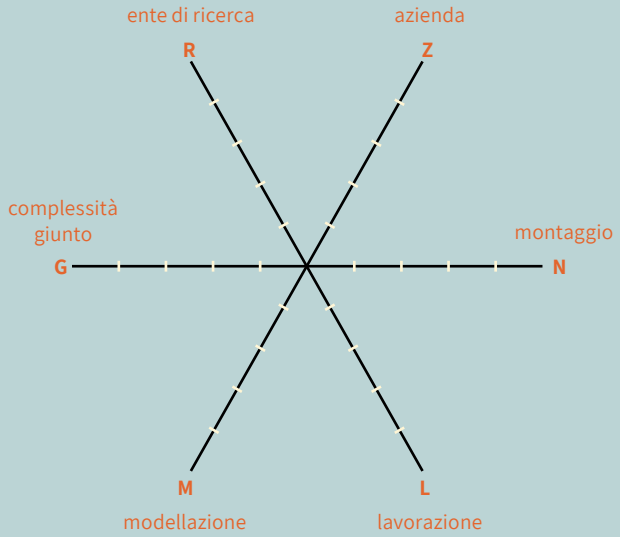
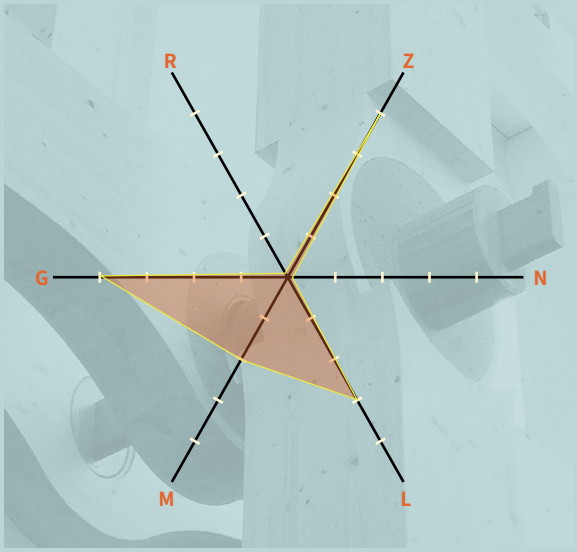
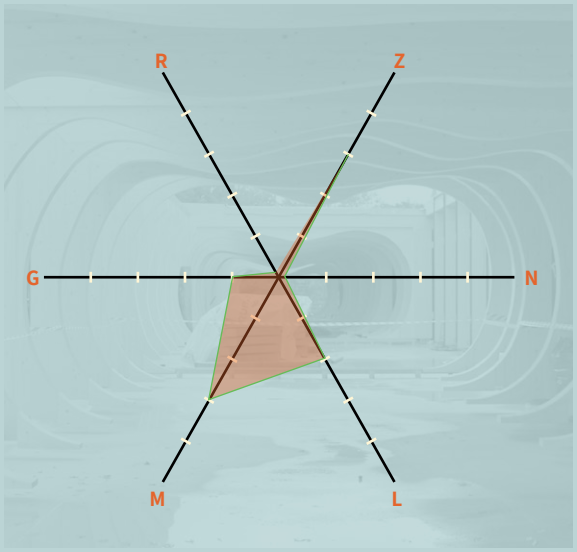


Diagramma di analisi dei casi studio: i parametri utilizzati si riferiscono alla collaborazione con enti di ricerca e con carpenterie, alla complessità del giunto e all'impiego dell'automazione nei processi di modellazione, lavorazione, montaggio, secondo i valori espressi nella precedente tabella.

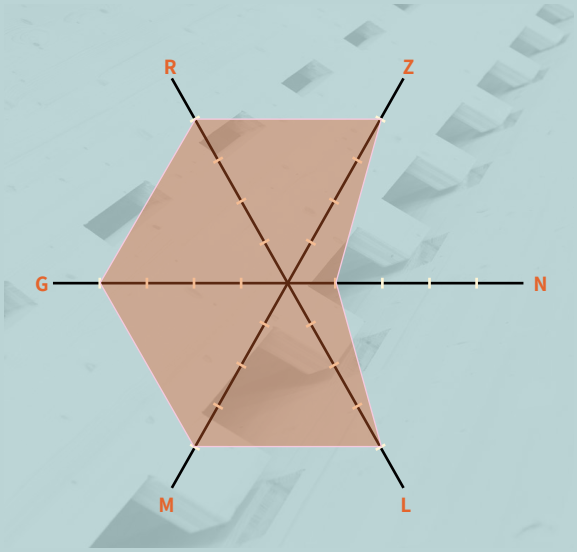
Quasi tutti i progetti sono stati elaborati in collaborazione con carpenterie e circa la metà con enti di ricerca. I casi studio analizzati si caratterizzano soprattutto per la complessità dei giunti, in particolar modo quelli legno-legno, rispetto alla complessità per tipologia di elementi utilizzati. I casi studio che riportano i valori più alti nella complessità del giunto, registrano anche un alto valore di collaborazione con la carpenteria.



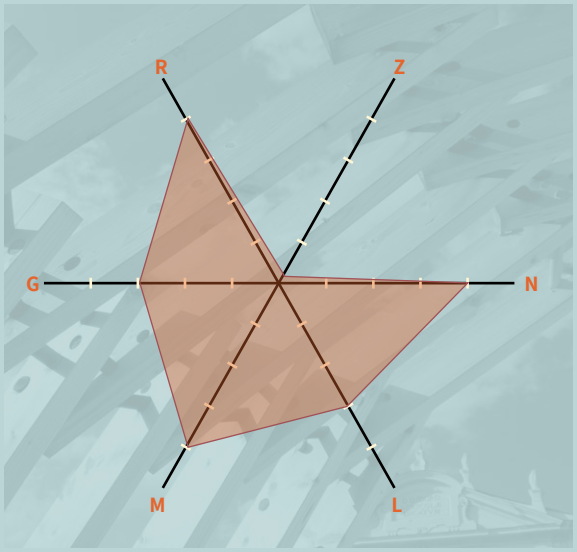
CS 01 TAMEDIA CENTRE
Zurigo, Svizzera



CS 02 ASILO NIDO LA BALENA
Guastalla, Reggio Emilia



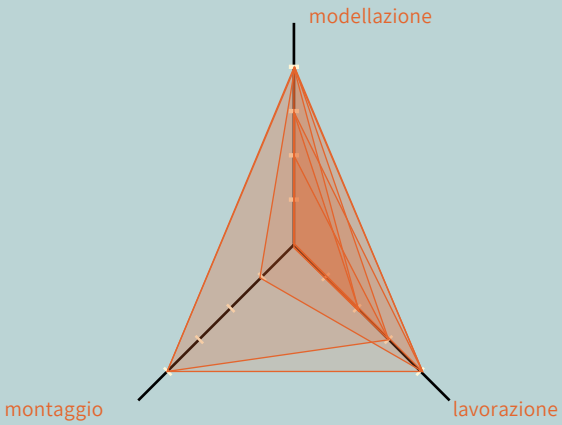
CS 05 PADIGLIONE VIDY
Losanna, Svizzera

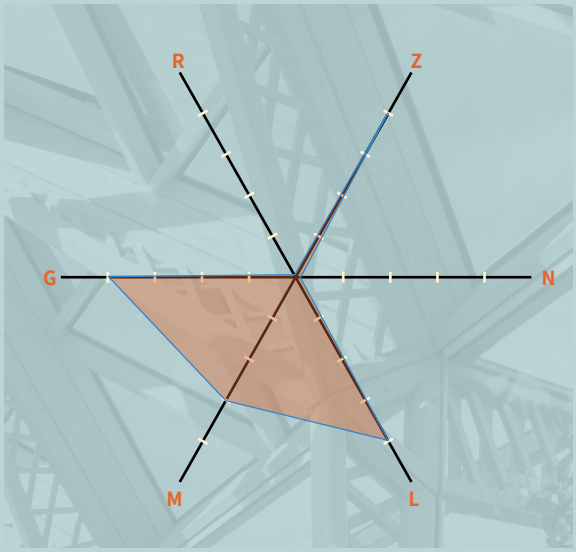


CS 06 GRADUAL ASSEMBLIES
Villa Maraini, Roma, Italia

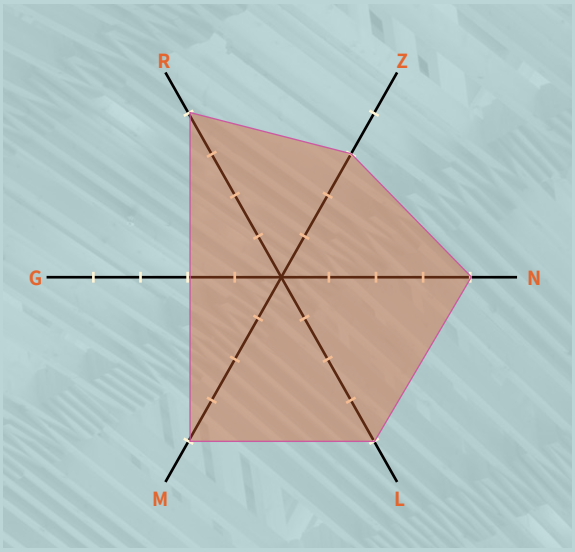
Il grafico AUTOMAZIONE riassume i principali processi in cui l'automazione viene impiegata nei differenti casi studio: modellazione, produzione e montaggio, riferiti in questo caso specifico ai componenti per impiego strutturale. Ciascun caso studio corrisponde a un'area in arancione e per ciascun di essi è riportato il valore espresso nella tabella precedente. Il grafico permette di confrontare direttamente ciascun caso studio sovrapponendo le differenti aree. Il grafico evidenzia come l'impiego dell'automazione sia maggiormente diffuso nel processo della modellazione; a seguire la produzione e quindi la lavorazione materiale, grazie ai software CAM che permettono di interfacciare il compute direttamente con la macchina. Infine l'automazione per il montaggio, in molti casi ancora in fase sperimentale.

AUTOMAZIONE

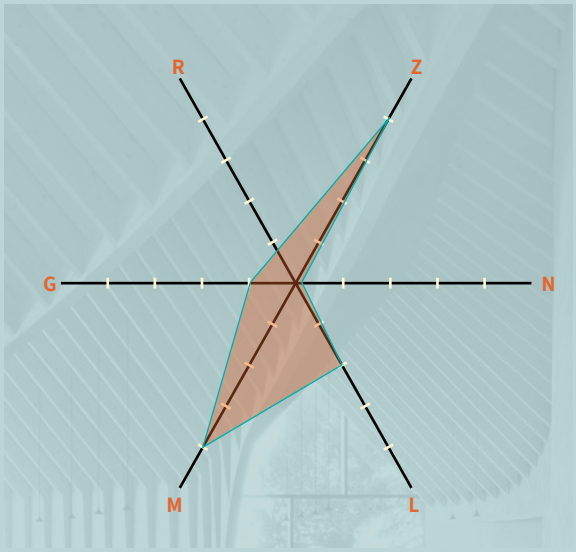




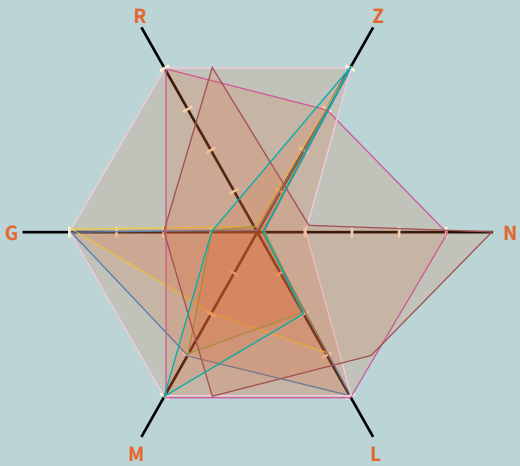
CS 03 MAGGIE'S MANCHESTER
Manchester, UK



CS 04 SEQUENTIAL ROOF
ITA - Zurigo, Svizzera



CS 07 RIFUGIO OBERHOLZ
Obereggen (BZ), Italia

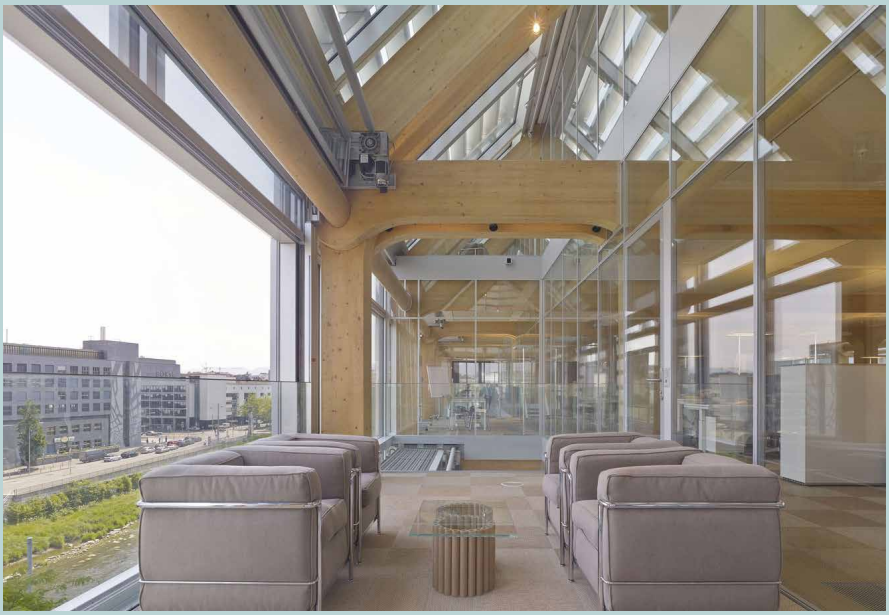


CS 01 TAMEDIA CENTRE
Zurigo, Svizzera 2013
Shigeru Ban Architects

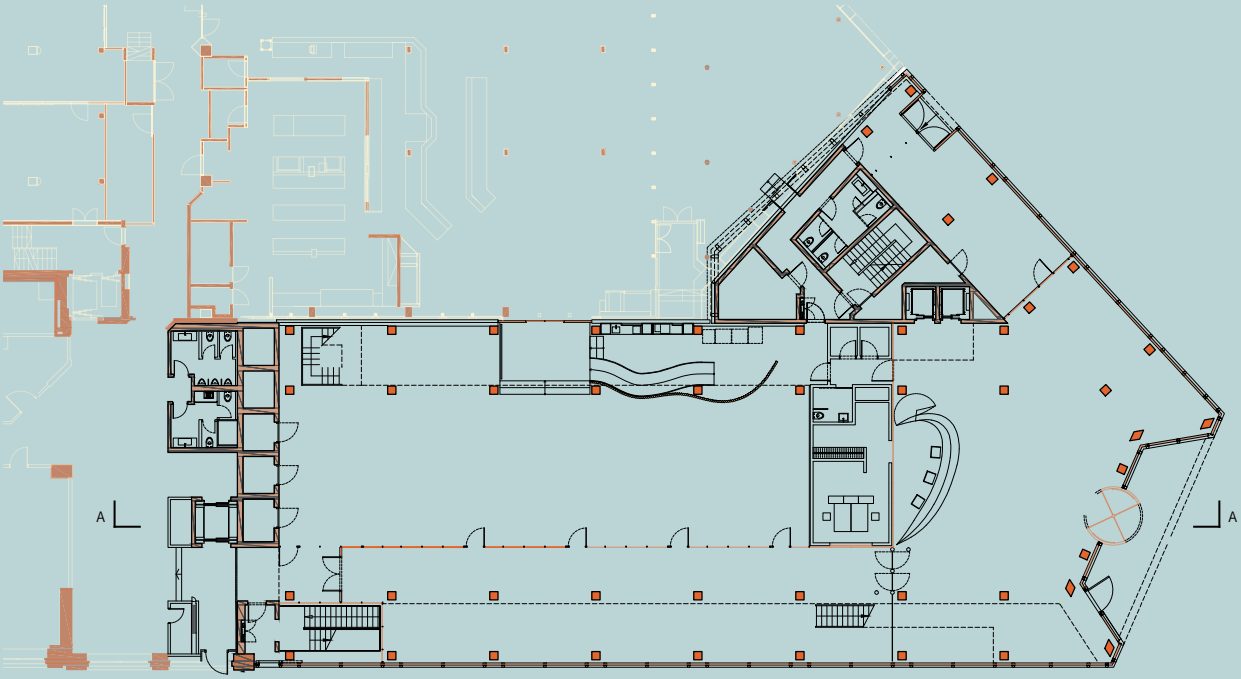


Nel 2013 viene inaugurato il Tamedia Centre di Zurigo, la nuova sede dell'omonima società di comunicazione svizzera. La società sceglie di affidare il progetto all'architetto giapponese Shigeru Ban, la cui attenzione all'uso dei materiali e allo sfruttamento di energia è stato motivo di interesse. Nel 2008 infatti i cittadini svizzeri votarono a favore dell'allora progetto (diventato legge dal 2017) "2000 Watt Society", volta a ridurre il consumo energetico, in funzione delle risorse energetiche disponibili.
Il progetto dei nuovi uffici viene eseguito dallo studio Shigeru Ban Architects e per lo sviluppo del sistema costruttivo, l'architetto si avvale della collaborazione, ormai consolidata con altri progetti precedenti come il Centre Pompidou di Metz (2010), dell'ingegnere Blumer Hermann, esperto di costruzioni in legno, della carpenteria svizzera Blumer Lehmann per la lavorazione del legno.
Il progetto prevede l'estensione di un palazzo preesistente, che viene sopraelevato di due piani e al quale viene addossato un nuovo corpo di 7 piani fuori terra: in entrambi i casi viene utilizzato lo stesso sistema costruttivo a telaio, in cui elementi e giunti sono realizzati interamente in legno, senza l'impiego di connettori in metallo. La maglia strutturale scandisce gli spazi interni dell'edificio: le campate laterali larghe circa 3 m, sono utilizzate come spazi per la distribuzione, aree relax e luoghi d'incontro. Questo spazio funziona come un filtro tra l'ambiente esterno e i luoghi di lavoro interni. Nello spazio centrale infatti sono disposti gli uffici e gli spazi per il lavoro: in quest'area le travi raggiungono i 14 m di lunghezza.
La struttura è stata realizzata tramite il montaggio di elementi componibili a secco, modellata per essere smontata: tutti gli elementi sono stati realizzati in laboratorio e assemblati direttamente in situ: il cantiere è durato da giugno 2011 ad agosto 2013.
Il Tamedia Centre ancora oggi risulta l'edificio in legno più alto della Svizzera. La volontà di utilizzare esclusivamente legno e di realizzare un telaio composto da elementi tra loro collegati a secco, sfruttando le qualità delle differenti specie di legno, ha permesso di seguire quanto indicato dal progetto di sostenibilità "2000 Watt Society". Sebbene si stimi che il costo della relalizzazione del Tamedia sia stato di 40 mil €, circa

Vista degli spazi interni alle campate minori lungo le facciate esterne, progettati per ospitare la distribuzione veriticale, aree relax e ai piani superiori gli uffici principali: gli elementi in legno della struttura scandiscono lo spazio. Shigeru Ban Architects



Pianta del piano terra della nuova sede: con i colori chiari la struttura preesistente a cui è stata addossata la nuova costruzione, di cui sono stati evidenziati in arancione i pilastri in legno lamellare del telaio. Shigeru Ban Architects



CS 01









Fasi di montaggio della struttura. Sono stati installati i telai una volta, a partire da quelli collegati alla struttura preesistente. Le aste del telaio sono state trasportate in cantiere già finite e in opera sono state eseguite le operazioni di collegamento tra le singole parti, direttamente in quota. Shigeru Ban Architects

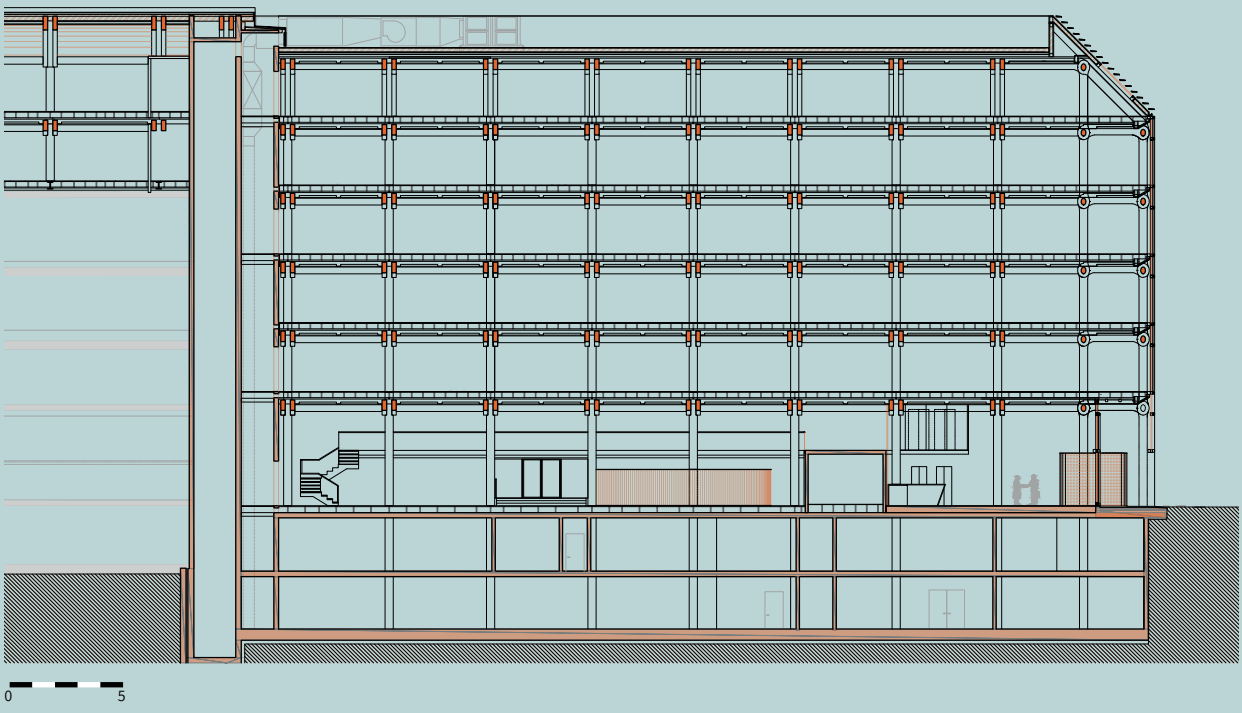
il 20% in più rispetto all'impiego di una tecnologia tradizionale come il cemento armato, l'edificio descrive un importante esempio di sostenibilità.

La struttura del Tamedia Centre è alta 7 piani ed è un telaio realizzato in legno lamellare di abete. La struttura è composta da 8 telai e ciascun telaio è composto dai seguenti elementi: una colonna a tutta altezza, 2 doppie travi di 17,4 m di lunghezza, le traverse (che funzionano come dei pioli) di 5,5 m. Questi ultimi vengono utilizzati nei punti di giunzione tra la colonna e il doppio travetto. La colonna e i doppi travetti sono stati realizzati in legno lamellare di abete mentre le traverse e l'elemento del giunto in multistrato di faggio.
La scelta del materiale è stata effettuata in base alle proprietà caratteristiche di ciascuna specie (il faggio ad esempio è molto utilizzato nei collegamenti perché è molto resistente) e alla disponibilità di materia prima nelle aree circostanti. Il legno è stato ricavato dalla regione di Steiermark, in Austria, che ancora oggi è la nazione con la più alta densità di foreste. Quest'area permetteva di soddisfare quanto richiesto dall'architetto Shigeru Ban, ovvero che la materia prima della struttura, in questo caso l'abete, provenisse dalla stessa area geografica e che fosse ad almeno

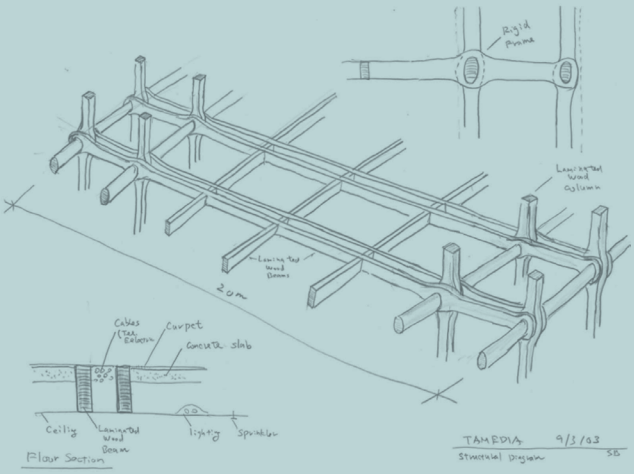


Vista esterna del Tamedia Centre: la facciata interamente vetrata permette di intravedere all'interno gli elementi del telaio portante in legno. Shigeru Ban Architects

Sezione verticale A-A del Tamedia Centre: il telaio in legno è stato utilizzato per realizzare il nuovo corpo dell'edificio, composto da 6 piani fuori terra, e la sopraelevazione sull'edificio preesistente, composto da 2 piani. Ciasuna trave è composta da un doppio elemento. Shigeru Ban Architects

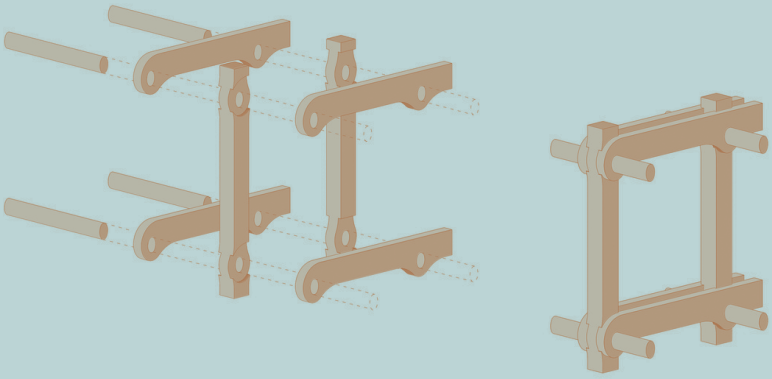


CS 01



Il sistema di collegamento tra il pilastro e gli elementi della trave: schizzi del sistema costruttivo e schema assonometrico che esemplifica la funzione del giunto realizzato in legno senza l'impiego di altri materiali. Shigeru Ban Architects

La giunzione tra gli elementi orizzontali e verticali avviene tramite un traverso di forma ovale, realizzato in multistrato di faggio. Una volta completato il giunto, le parti in multistrato di faggio non sono più visibili. Philippe Rueger



una quota di 1.000 m di altitudine. In questo modo si poteva garantire un comportamento quanto più omogeneo del materiale naturale e un buon valore di resistenza, grazie alla crescita lenta della pianta che mantiene il materiale più stabile.
Per realizzare la struttura sono stati impiegati 2.000 mc di legno lamellare di abete rosso e per ottenere questa quantità, sono state utilizzate circa 3.600 piante. Le operazioni di prima e seconda lavorazione per realizzare il legno lamellare sono state eseguite in Austria, luogo di origine delle piante utilizzate.
Il legno lamellare è stato successivamente trasportato in Svizzera presso la carpenteria Blumer Lehmann per le lavorazioni di sagomatura. Sono stati realizzati oltre 1.400 elementi strutturali, per la costruzione dei pilastri e dei doppi travetti. Le lavorazioni sono state eseguite con una fresatrice CNC, grazie alla quale è stato possibile ottimizzare i tempi di produzione e garantire un'elevata precisione, necessaria per effettuare i collegamenti legno-legno in cantiere.
Al legno non è stato applicato alcun materiale ignifugo o vernici protettive: per questo motivo gli elementi hanno una sezione sovradimensionata rispetto quella utile, le colonne ad esempio hanno una sezione pari a 440x440 mm. Questa sovradimensione contribuisce ad aumentare la durata di resistenza al fuoco, dal momento che in caso di incendio la fiamma dovrà bruciare più materia. Tuttavia questo contribuisce ad aumentare anche il peso complessivo del sistema strutturale, già caratterizzato da un alto numero di elementi: ogni telaio pesa complessivamente 24 t.
Il cantiere è durato circa due anni e per il montaggio della struttura. Il legno è stato trasportato durante la notte e immediatamente installato, assemblando un telaio alla volta, interamente da terra a cielo. Una volta installata la colonna alta 21 m, sono stati inseriti gli elementi orizzontali.





Montaggio delle ultime aste del telaio in copertura: le aste venivano movimentate dalla gru mentre le operazioni di collegamento venivano eseguite manualmente dagli operai. La precisione della sagomatura dei giunti è stata necessaria al fine di agevolare le fasi di montaggio. Shigeru Ban Architects

La lavorazione degli elementi in laboratorio: a sinistra i connettori in multistrato di faggio con tenone in testa; a destra fase di controllo e rifinitura del foro sull'elemento colonna per l'alloggiamento del tondo in multistrato di faggio e traverso ovale. Blumer Lehmann







CS 02 ASILO NIDO LA BALENA
Guastalla, Reggio Emilia 2015
Mario Cucinella Architects MCA



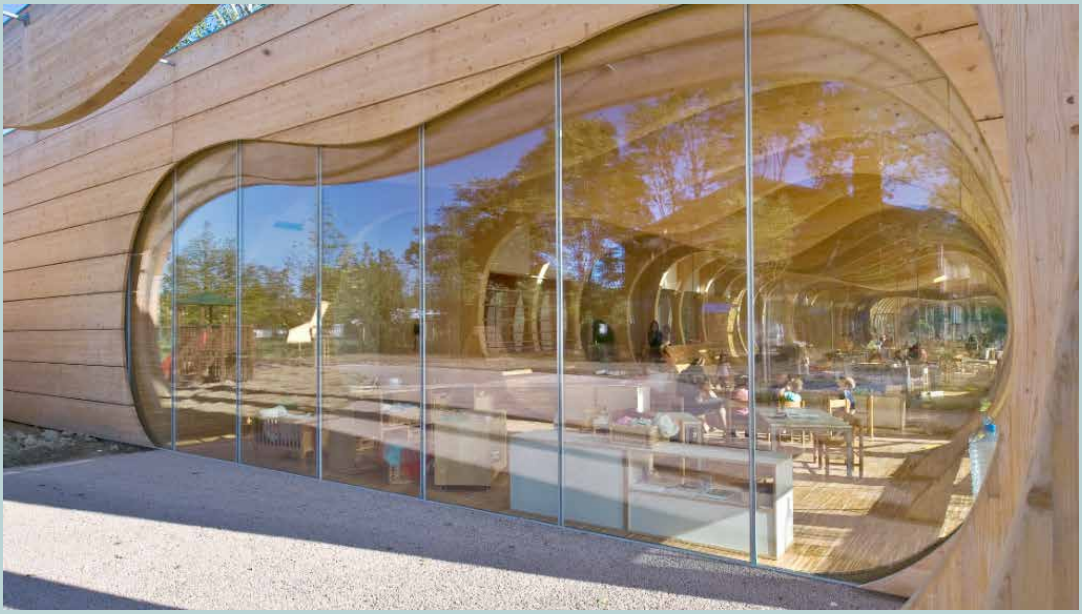
Il progetto di MCA è risultato il primo classificato nel concorso per la ricostruzione di un asilo nido comunale, necessario per la sostituzione di delle due strutture preesistenti (Pollicino e Rondine), non più agibili dopo il terremoto del 2012. L'asilo nido La Balena è stato portato a termine nel 2015 e ospita bambini con età compresa tra zero e tre anni.
Obiettivo del progetto è realizzare uno spazio in relazione con il parco circostante e allo stesso tempo, uno spazio che potesse essere vissuto in maniera creativa dai bambini. L'edificio si sviluppa longitudinalmente lungo l'asse Nordest - Sudovest: negli spazi esposti a sud sono inserite sei aule per il gioco, separate le une dalle altre da pareti in vetro. Questa soluzione progettuale permette di percepire l'intero spazio dedicato alle aule e il susseguirsi dei telai in legno che compongono l'ossatura dell'edificio. Tra i telai viene utilizzato un tamponamento trasparente nella zona delle aule (con sistema di tende per la protezione solare) e un tamponamento opaco per le zone esposte a nord, utilizzato come spazio di distribuzione per accedere alle aule e alle stanze disposte lungo la spina centrale dell'edificio. In questa zona sono stati situati i servizi igenici, le zone per il riposo, i laboratori per i bambini, spazi di servizio come lavanderia o magazzini.
È stata posta attenzione all'illuminazione naturale e artificiale della scuola: nelle aule vengono sfruttate le vetrate interposte tra i telai della struttura; nelle sale più interne sono stati invece realizzati dei lucernari. Per la luce artificiale

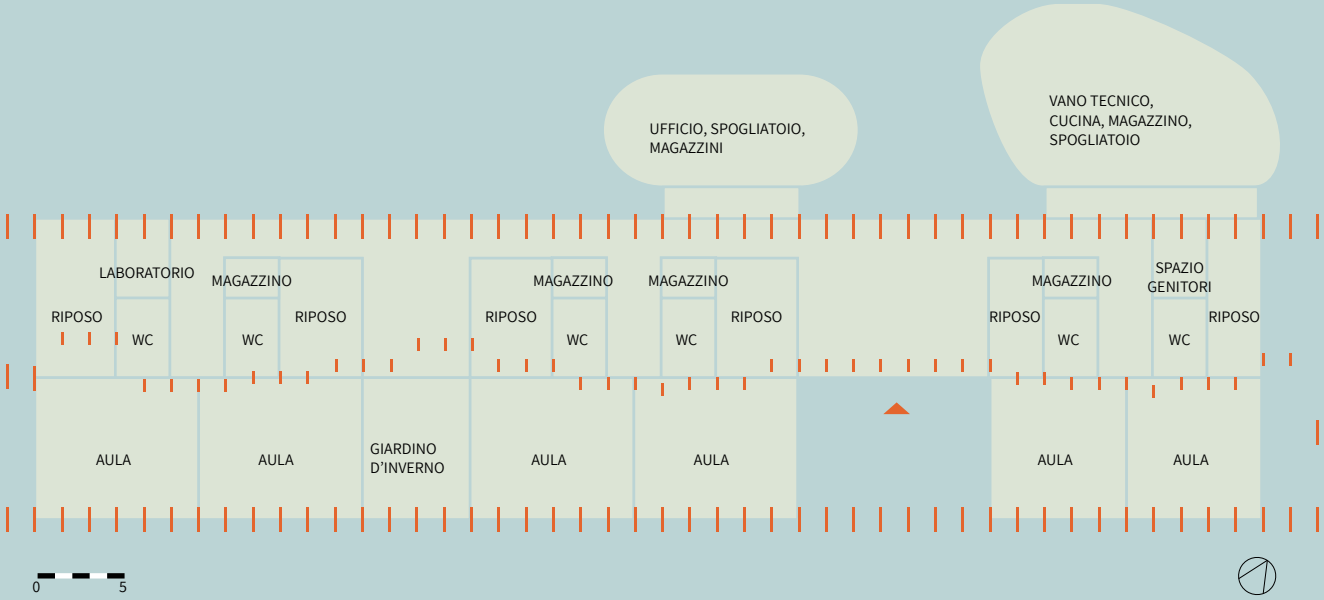
Vista interna di una delle aule della scuola, con il dettaglio del pavimento inclinato che segue l'andamento del telaio della struttura: questo dettaglio è stato progettato per realizzare uno spazio gioco per i bambini. Moreno Maggi

Nella pagina accanto. Vista esterna e interna della scuola: emerge la struttura composta da 50 portali in legno, disposti ogni 1,60 m circa. all'esterno scandiscono regolarmente una superficie lineare in vetro, mentre all'interno, grazie alla loro particolare lavorazione, e all'impiego di tamponamenti trasparenti interposti tra i telai che permettono di filtrare la luce esterna per tutta la sua lunghezza, riproducono l'immagine delle costole della balena. ClimaVeneta

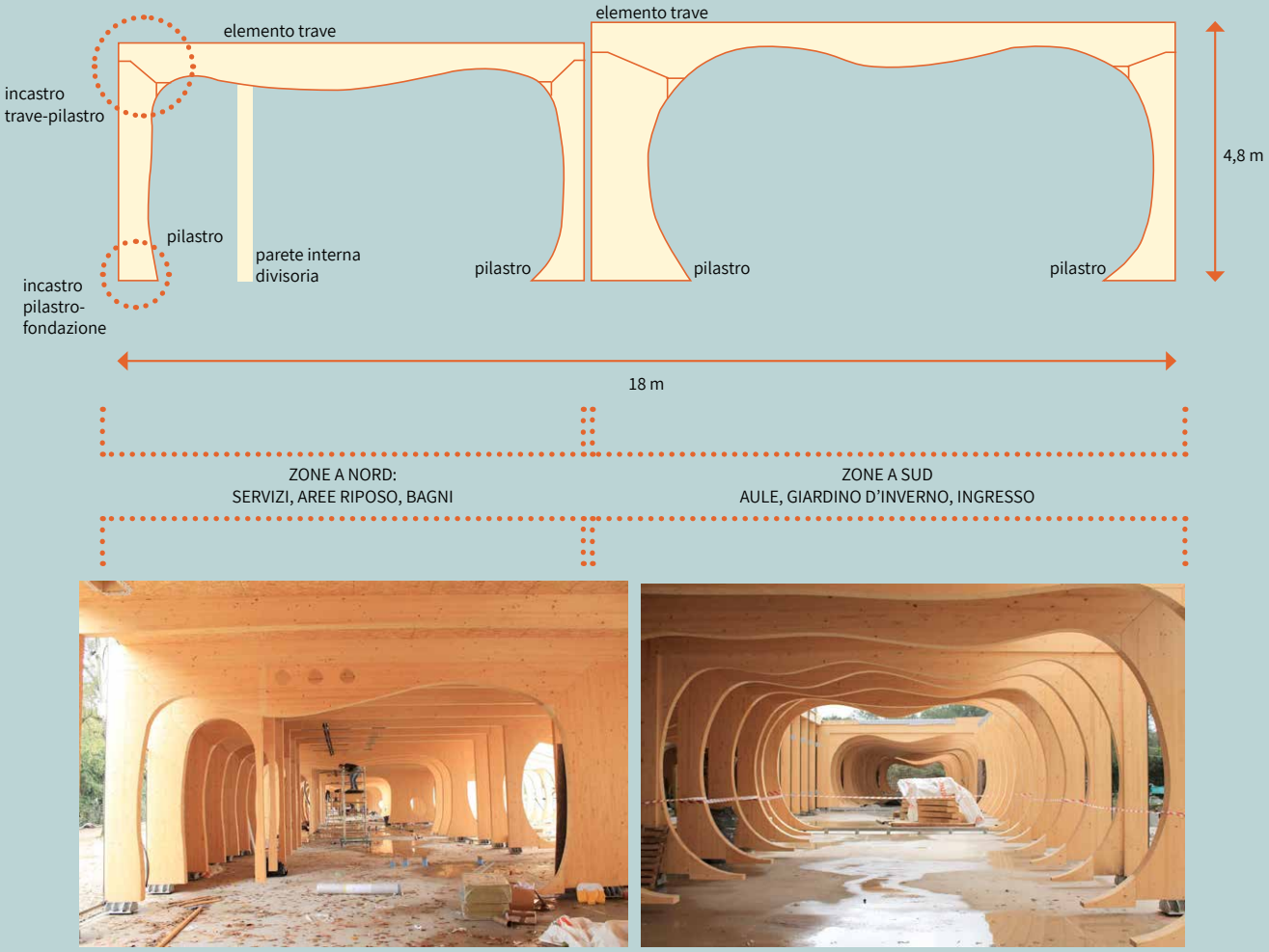
Pianta e distribuzione degli spazi interni: in arancio l'elemento di elevazione verticale del telaio. Ciascun telaio è composto da due campate di dimensioni variabili.






UFFICIO, SPOGLIATOIO, MAGAZZINI
VANO TECNICO, CUCINA, MAGAZZINO, SPOGLIATOIO
LABORATORIO
MAGAZZINO
MAGAZZINO
MAGAZZINO
MAGAZZINO
SPAZIO GENITORI
RIPOSO
WC
RIPOSO
RIPOSO
WC
RIPOSO
RIPOSO
WC
RIPOSO
RIPOSO
WC
RIPOSO
WC
AULA
AULA
GIARDINO D'INVERNO
AULA
AULA
AULA
AULA
0
5

CS 02



Schema di un portale realizzato in legno lamellare in abete. Un portale è composto 2 campate e 3 punti di appoggio ciascuno dei quali è collegato a terra tramite una cerniera. Le parti del telaio sono tra loro collegate mediante piastre e connettori in metallo posti all'interno degli elementi in legno. Le forature sono state chiuse con tasselli in legno della stessa specie, contribuendo a nascondere il sistema di collegamento. Rubner Holzbau

Nella pagina accanto. La struttura installata in opera: le parti del telaio sono state prefabbricate, predisponendo già le piastre in metallo utili ai collegamenti. La morfologia degli elementi in legno è stata sviluppata in relazione alla loro disposizione all'interno degli ambienti, per agevolare l'interazione tra gli spazi (come le aule) o per riprodurre degli ambienti più chiusi (come nelle stanze per il riposo o per i servizi). Rubner Holzbau

sono state installate lampade a basso consumo energetico. La stessa attenzione è stata posta anche nell'impiego di altre risorse: la scuola è infatti dotata di impianto e vasca per la raccolta delle acque piovane, di impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica, di una pompa di calore per riscaldare e raffrescare gli ambienti interni.

Il corpo principale dell'edificio è un piano fuori terra e si sviluppa per una lunghezza di 78 m e una larghezza di 18 m. Il sistema costruttivo è composto da 50 telai disposti con un interasse di 1,60 m circa. Ciascun telaio è composto da elementi in legno lamellare in abete: ha tre elementi di appoggio per l'elevazione verticale e una trave. La struttura in legno è stata realizzata dall'azienda Rubner Holzabau di Bressanone (BZ) con l'impiego di una macchina CNC. Ciascun elemento ha richiesto una lavorazione ad hoc poiché hanno sagome differenti l'una dall'altra.
Per i collegamenti sono stati utilizzati elementi metallici, differenti in funzione del punto di connessione: la trave e il pilastro sono tra loro incastrati attraverso l'impiego di barre filettate metalliche incollate nella testa del pilastro e collegate attraverso un sistema di bullonatura nelle travi. Tra il pilastro e la fondazione è stata invece realizzata una cerniera sempre tramite l'impiego di elementi metallici: in questo caso era indispensabile creare un collegamento che garantisse di staccare la struttura in legno da terra per mantenere la struttura asciutta.
Nei pilastri in legno sono inserite delle piastre in acciaio per realizzare il collegamento con la scarpa metallica anco-

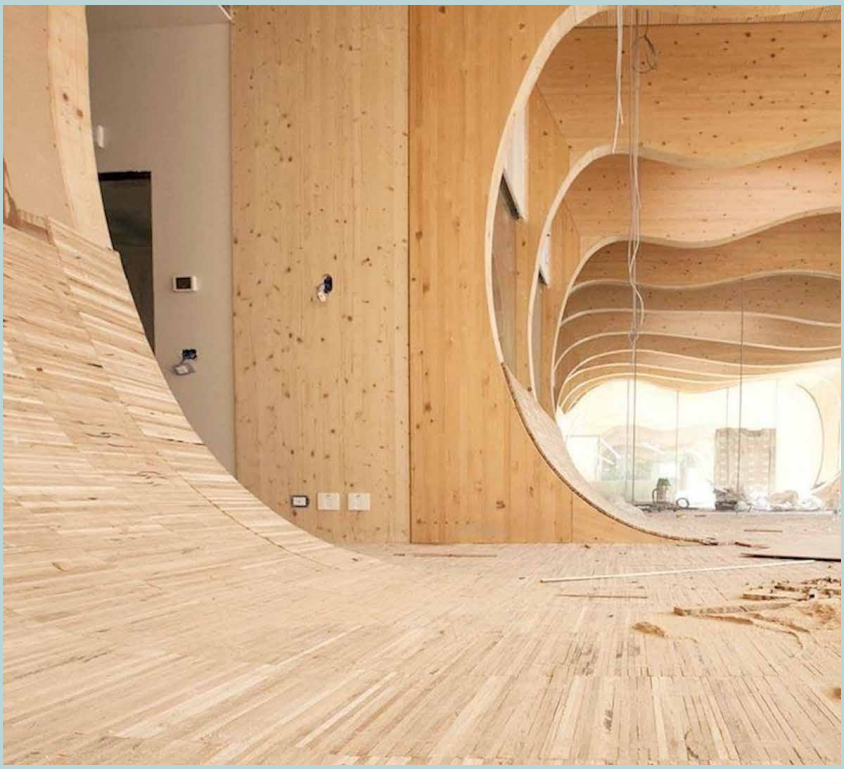


rata alle fondazioni. I giunti non sono visibili esternamente, poiché gli elementi metallici sono interni e i connettori sono stati successivamente coperti con tasselli in legno.
Le tipologie dei collegamenti progettati hanno permesso di realizzare gran parte degli elementi e delle lavorazioni direttamente negli stabilimenti di Rubner Holzabau, controllandone la qualità e agevolando le successive fasi di montaggio, riducendone i tempi. Sono stati impiegati circa 200 mc di legno lamellare per realizzare il sistema costruttivo.
Sono state utilizzate differenti tipologie di tamponamento: una trasparente per la zona delle aule, e una opaca per la facciata a nord per la zona distributiva.
Le chiusure verticali opache sono composte da pannelli in abete a tre strati incrociati, pannello OSB di 18 mm per la



CS
02





Una volta installati i portali e i collegamenti per l'irrigidimento (pannelli in legno e cavi in acciaio), si sono susseguite le fasi di montaggio delle chiusure esterne, la disposizione degli impianti (sistema di riscaldamento e raffrescamento a terra) e la finitura della pavimentazione realizzata con sottili listelli in legno, attraverso i quali è stato possibile riprodurre la curvatura della superficie del pavimento che sale lungo la parete, per creare uno spazio gioco per i bambini. Carlotta Balena

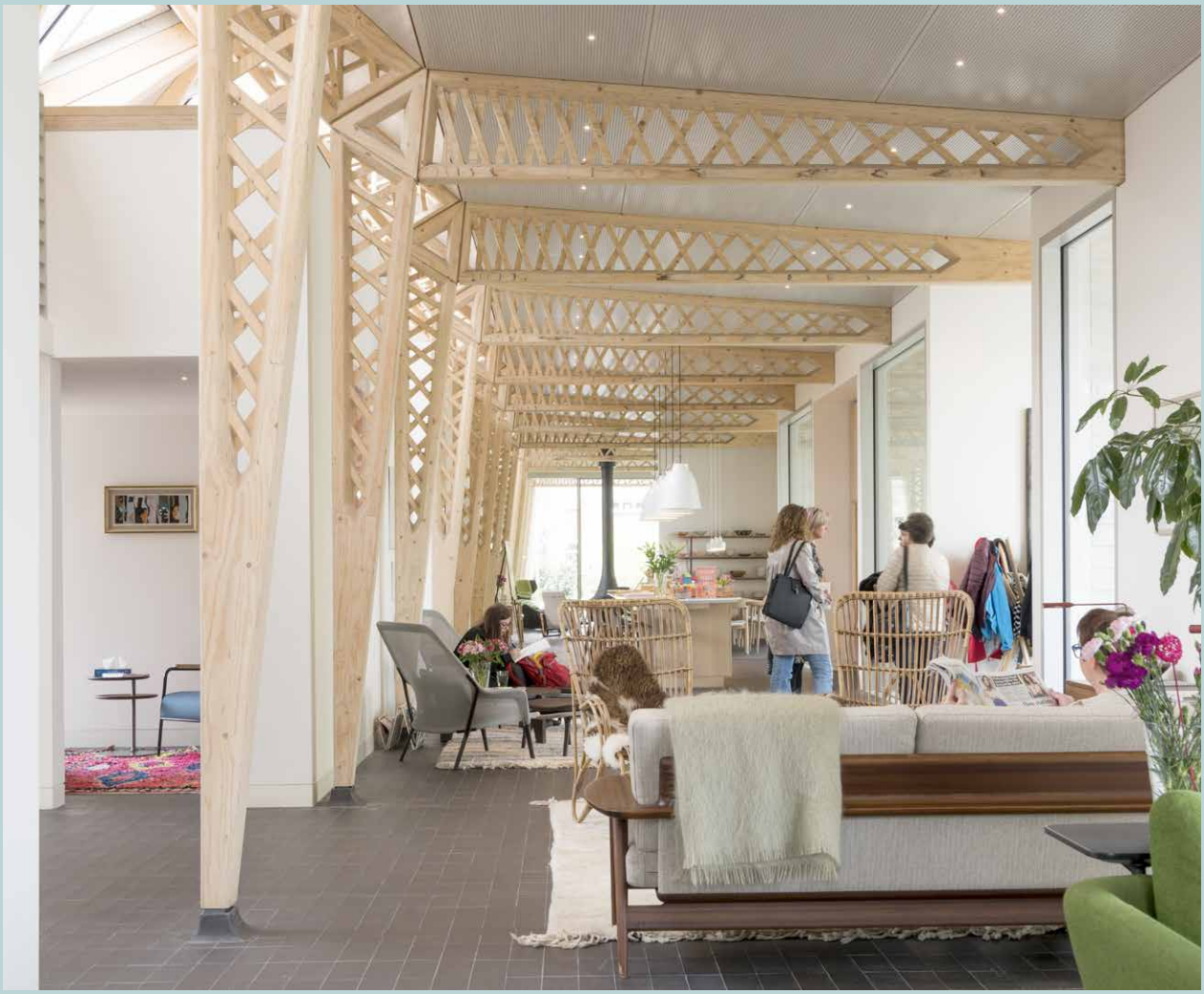
Vista interna di una delle aule: per la schermatura dall'irraggiamento solare sono state installate delle tende avvolgibili interne. Carlotta Balena



ventilazione della facciata, pannello in lana di roccia, barriera al vapore e rivestimento con listelli in larice: la chiusura è assemblata completamente a secco. I pannelli a strati incrocati in abete contribuiscono inoltre a controventare la struttura.
Nella facciata a Sud sono presenti dei controventi in acciaio a croce di sant'Andrea, lasciando quando più libera l'intercapedine tra i portali dove sono disposte le lastre in vetro per la chiusura trasparente. Sono state utilizzate lastre con vetrocamera di dimensioni 1,4 m x 4 m e sono state posizionate sull'estradosso del telaio, dove è disposto anche lo strato coibente.

lici: in questo caso era indispensabile creare un collegamento che garantisse di staccare la struttura in legno da terra per mantenere la struttura asciutta.
Nei pilastri in legno sono inserite delle piastre in acciaio per realizzare il collegamento con la scarpa metallica ancorata alle fondazioni. I giunti non sono visibili esternamente, poiché gli elementi metallici sono interni e i connettori sono stati successivamente coperti con tasselli in legno.
Le tipologie dei collegamenti progettati hanno permesso di realizzare gran parte degli elementi e delle lavorazioni direttamente negli stabilimenti di Rubner Holzabau, controllandone la qualità e agevolando le successive fasi di montaggio, riducendone i tempi. Sono stati impiegati circa 200 mc di legno lamellare per realizzare il sistema costruttivo.
Sono state utilizzate differenti tipologie di tamponamento: una trasparente per la zona delle aule, e una opaca per la facciata a nord per la zona distributiva.
Le chiusure verticali opache sono composte da pannelli in abete a tre strati incrociati, pannello OSB di 18 mm per la ventilazione della facciata, pannello in lana di roccia, barriera al vapore e rivestimento con listelli in larice: la chiusura è assemblata completamente a secco. I pannelli a strati incrocati in abete contribuiscono inoltre a controventare la struttura.
Nella facciata a Sud sono presenti dei controventi in acciaio a croce di sant'Andrea, lasciando quando più libera l'intercapedine tra i portali dove sono disposte le lastre in vetro per la chiusura trasparente. Sono state utilizzate lastre con vetrocamera di dimensioni 1,4 m x 4 m e sono state posizionate sull'estradosso del telaio, dove è disposto anche lo strato coibente.

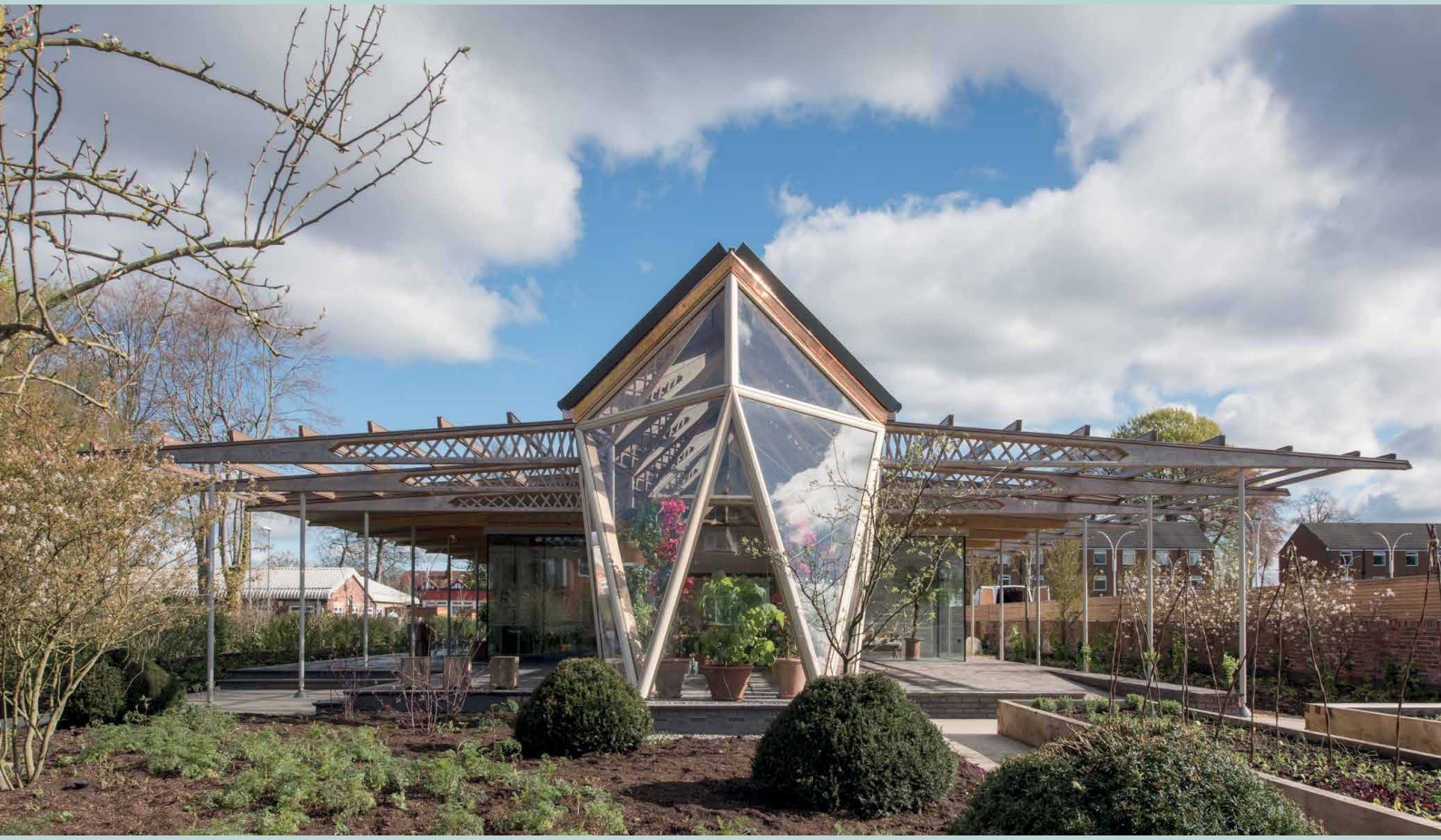
CS 03 MAGGIE'S MANCHESTER
Manchester, United Kingdom 2016
Foster + Partners

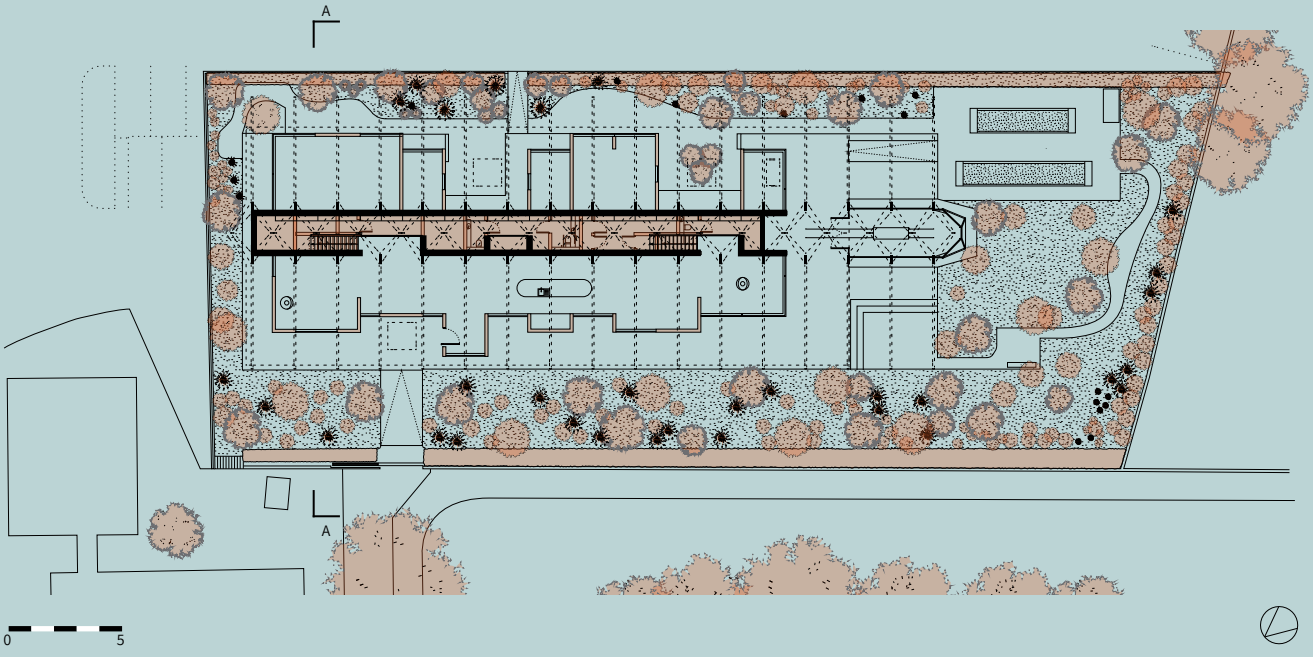


Il progetto è stato realizzato per la Fondazione Maggie, rivolta alle persone affette da cancro, per sostenerle durante le cure, soprattutto dal punto di vista psicologico. Obiettivo della Fondazione è quello di costruire degli ambienti accoglienti e dei punti di ritrovo, in cui i pazienti possano seguire le terapie. Maggie Keswick Jencks costruisce questa organizzazione insieme a Laura Lee, infermiera specializzata, con l'obiettivo di realizzare centri distribuiti sul territorio inglese per offrire un supporto puntuale alle persone. La volontà è stata fin dall'inizio quella di creare edifici dalle ridotte dimensioni, che ricordassero gli ambienti domestici, in cui la natura, attraverso la luce e il verde potessero essere protagoniste.
Il primo centro viene realizzato nel 1996 a Edimburgo ad opera di Richard Murphy. Negli anni seguenti furono aperti altri 20 centri, tutti progettati da architetti differenti. Tra i più recenti troviamo il centro a Manchester, per il quale è stato coinvolto lo studio Foster + Partners.
Obiettivo del progetto, a partire dai principi della Fondazione, è quello di offrire una sensazione di leggerezza e naturalità, aspetti che vengono incorporati dalla definizione del sistema costruttivo, parte integrante dello spazio. Ne risulta un luogo in cui la protagonista è l'eleganza della struttura, composta da portali che scandiscono l'edificio, sviluppato longitudinalmente.
Al piano terra lungo i lati esterni si alternano spazi calmi e spazi di ritrovo, mentre nella zona centrale, chiusa superiormente da un soppalco, si trovano ambienti più privati e raccolti: nella zona superiore, lungo l'asse longitudinale dell'edificio, sono disposti gli uffici. La struttura è sta-

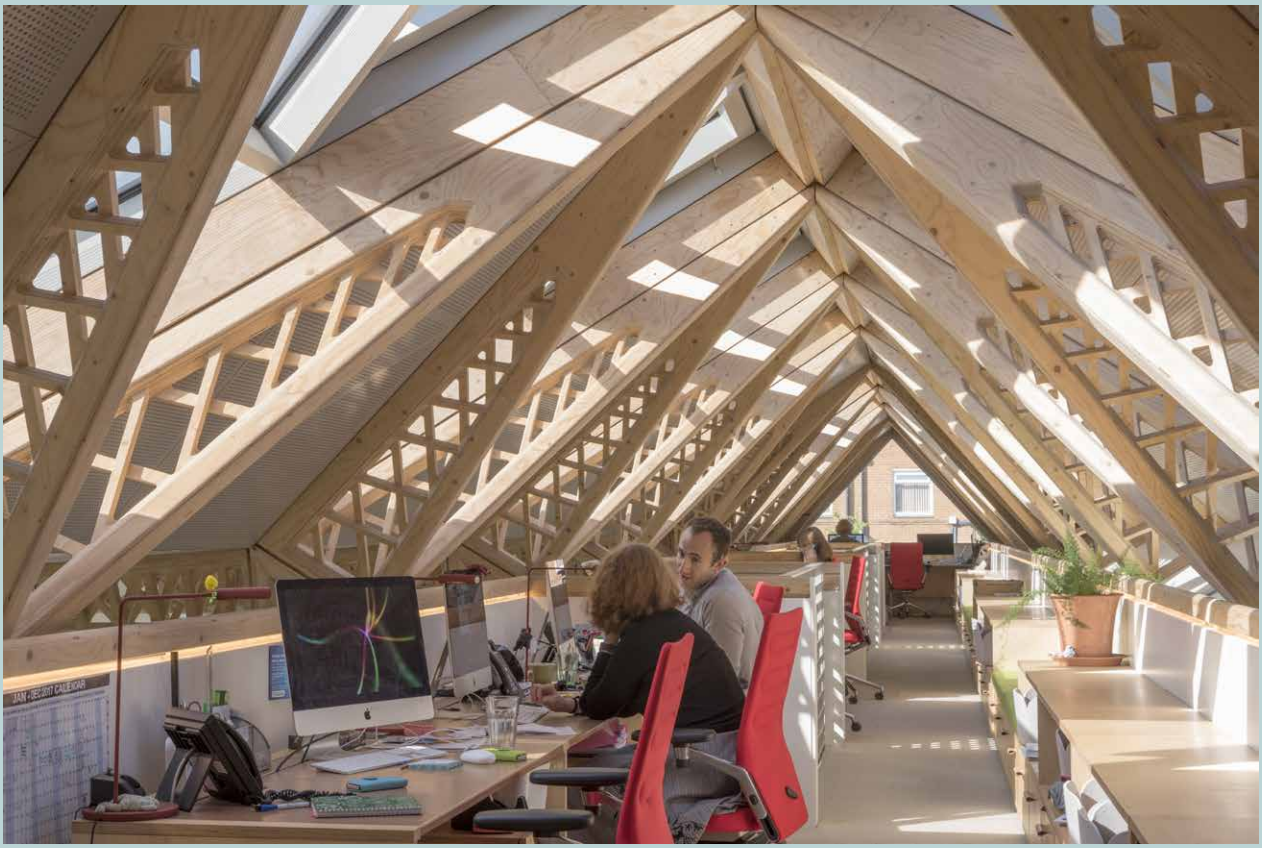
Vista interna di un'area laterale con zone relax: gli elementi reticolari della struttura sono protagonisti dello spazio, realizzati in legno lamellare d'abete. Katy Harris

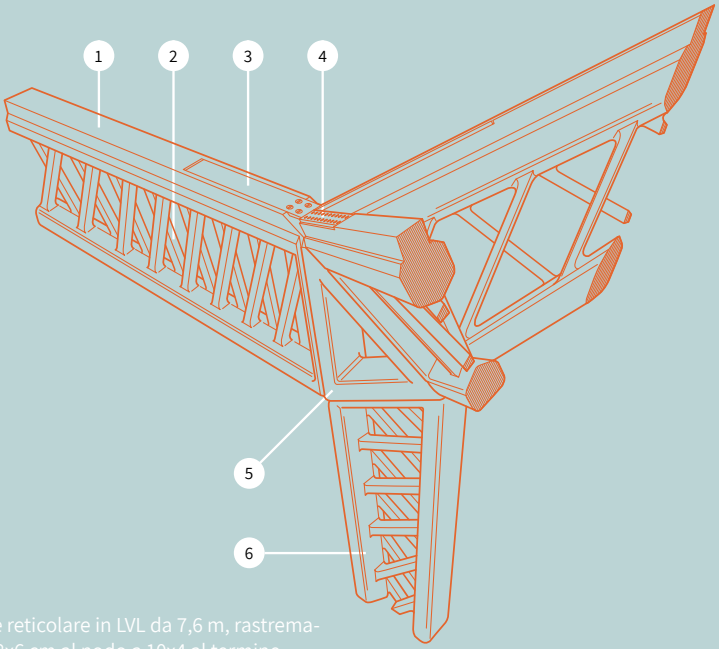
Vista esterna dell'edificio: in testa all'edificio è stata realizzata la serra che si integra con lo spazio circostante dedicato all'orto. Gli elementi in legno dei portali si rastremano verso l'esterno. Katy Harris
Pianta del primo piano dell'edificio, in cui è visibile il soppalco della zona centrale, e le aree del piano terra lungo le zone laterali dell'edificio. Foster+Partners




A
A
0
5

CS 03

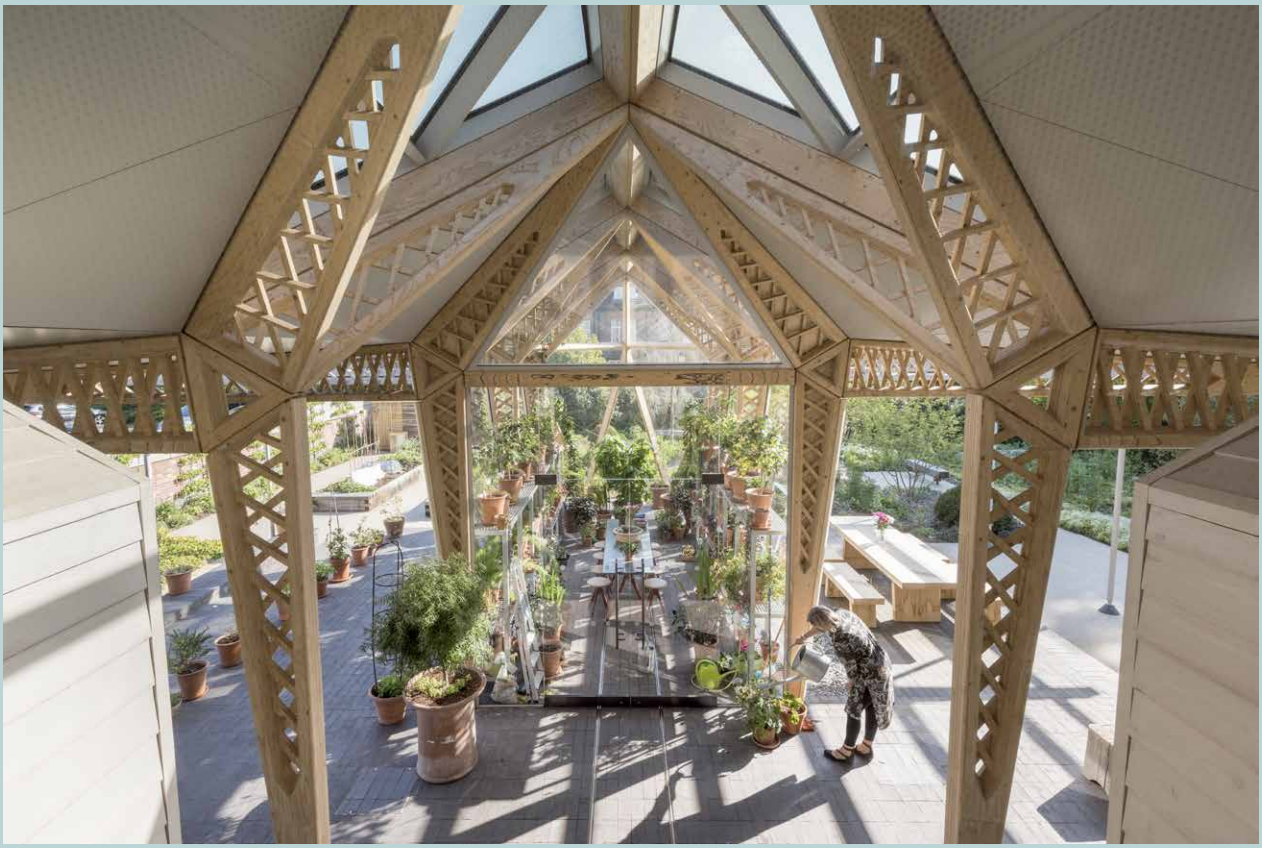


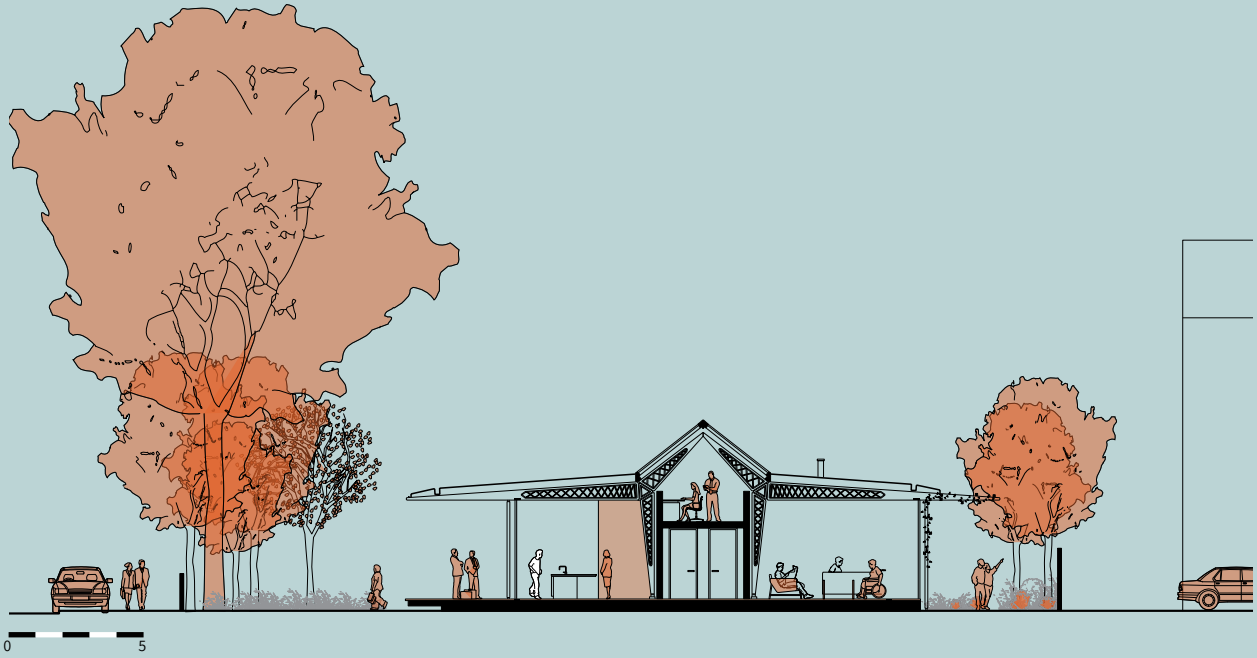


1. Trave reticolare in LVL da 7,6 m, rastremata da 58x6 cm al nodo a 10x4 al termine
2. Montanti in legno di abete rosso
3. Piatto in acciaio da 50 mm
4. Piatto in acciaio da 30 mm
5. Nodo triangolare in legno
6. Colonna reticolare in LVL

Il soppalco disposto nella zona centrale, caratterizzato dalle travi reticolari rastremate dei portali che costituiscono l'ossatura della copertura. Katy Harris
Dettaglio del collegamento tra gli elementi del portale: il pilastro, la trave a sbalzo e le travi inclinate per la copertura. Si tratta di elementi reticolari, rastremati in lunghezza, realizzati in LVL in abete. Per collegare le parti del telaio è stato realizzato un incastro tramite un elemento triangolare, in LVL in abete anch'esso, connesso con piastre in metallo. Foster + Partners

VIsta interna sulla serra disposta in testa all'edificio: in queste aree la struttura del portale può essere vista interamente, a differenza delle aree centrali in cui è stato realizzato uno spazio soppalcato. Katy Harris
Nella sezione AA la struttura del portale composta da elementi reticolari scandisce gli spazi: la zona centrale al piano terra dedicata ai servizi e chiusa da tamponamenti opachi; la zona centrale al piano superiore dedicata agli uffici e comunicante con gli spazi laterali, in cui sono state realizzate aree relax e di intrattenimento. Gli spazi laterali sono chiusi con elementi in vetro e le travi dei portali proseguono all'esterno, prolungando l'estensione della copertura. Foster+Partners




0
5

CS
03



ta realizzata in LVL (Laminated Veneer Lumber) in abete con la collaborazione dell'azienda svizzera Blumer Lehmann: l'impiego di tecnologie avanzate come una macchina CNC a 5 assi, ha permesso di realizzare questa tipologia di strutture e soprattutto di ottimizzare l'impiego del materiale.

La struttura è costituita da 17 portali identici realizzati in legno LVL in abete, disposti linearmente a distanza di 3 m: ogni portale è costituito da due colonne, due travi a sbalzo e quattro travi inclinate per la copertura. Queste parti si connettono tramite piastre d'acciaio a un elemento triangolare che costituisce l'incastro del portale. Ad eccezione di quest'ultimo, travi e colonne sono elementi reticolari, la cui progettazione è stata ispirata alle strutture utilizzate per le aviorimesse.
La particolarità del progetto, resa possibile grazie all'integrazione di strumenti digitali fino dalle prime fasi della progettazione, è il dimensionamento delle aste degli elementi reticolari. Ciascuna asta è dimensionata in funzione del carico che deve sopportare. Per questo motivo le aste hanno dimensioni e sezioni differenti. Ne risulta un progetto molto complesso poiché le aste sono oltre 10 mila e presentano differenti geometrie.
La tecnologia ha contribuito a ottimizzare la produzione di tutte le parti e soprattutto di quelle in legno LVL rispondendo alle richieste del progettista in maniera sempre più efficiente, sia in termini di qualità che di costi.
Tutte le parti strutturali del telaio sono state lavorate nella carpenteria svizzera e poi trasportate in cantiere per il montaggio: i collegamenti sono stati realizzati con l'impiego di piastre in acciaio. Il giunto modellato per la connessione degli elementi del telaio è un incastro e contribuisce a irrigidire la struttura.

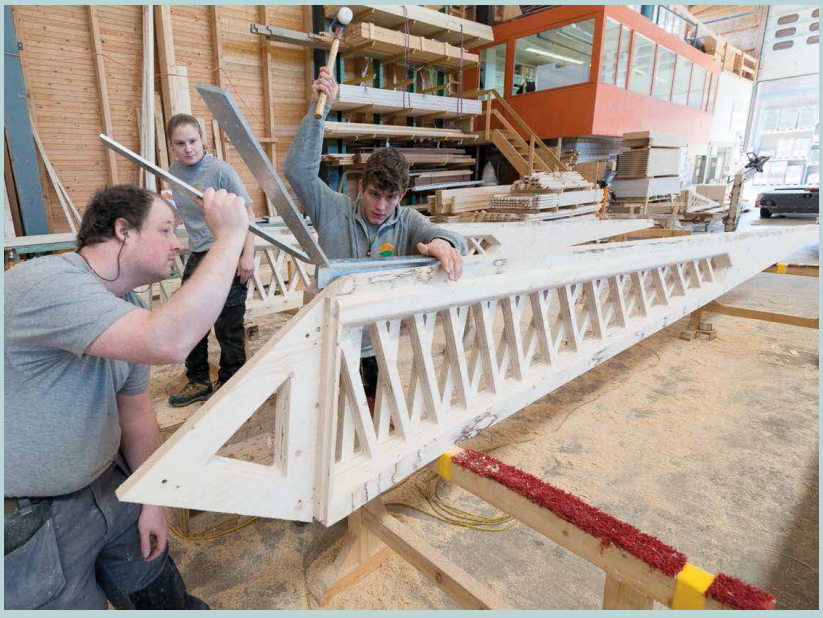






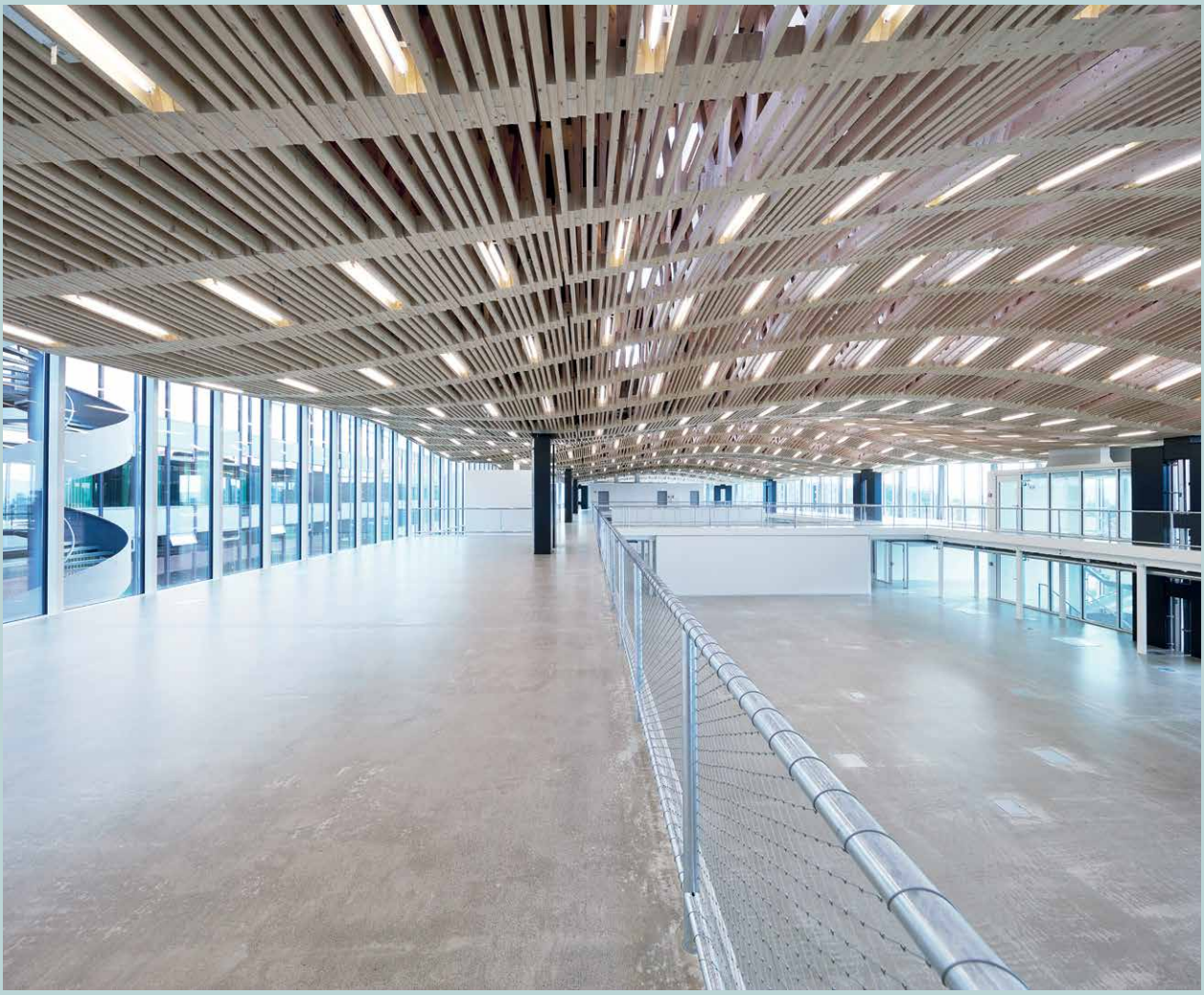
Sopra. Le travi a sbalzo dei portali si rastremano verso l'esterno: ogni asta diagonale è stata dimensionata in base alle tensioni a cui è sottoposta, permettendo di disporre in opera eslusivamente in materiale necessario, senza sovradimensionare ciascuna asta in funzione della più sollecitata. Katy Harris

Alcune fasi di montaggio e lavorazione degli elementi: montaggio del telaio in cantiere, con successiva disposizione degli elementi di tamponamento; nella carpenteria Blumer Lehamnn, produzione degli elementi del portale e predisposizione della carpenteria metallica per la realizzazione dei giunti. Andrew Stuart, Nigel Young, Katy Harris



CS 04

SEQUENTIAL ROOF
ITA - Istituto di tecnologia in architettura Zurigo, Svizzera 2016
Gramazio Kohler Research, ETH Zurigo



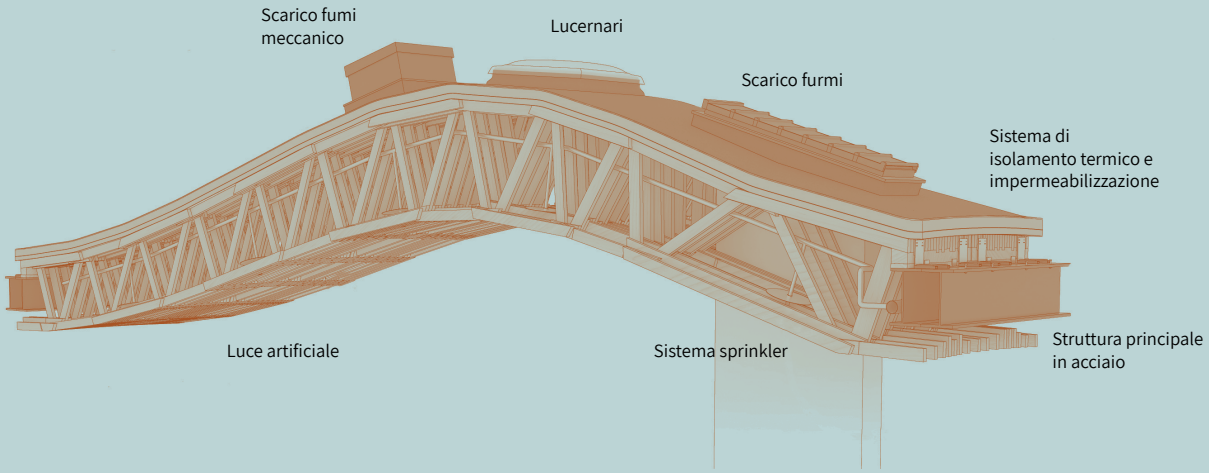
Sequential Roof è la copertura in legno progettata e sviluppata attraverso la collaborazione di Gramazio Kohler Research all'ETH di Zurigo, Arch-Tec-Lab AG, Dr. Luechinger + Meyer Bauingenieure AG, ROB Technologies AG e prodotto da ERNE AG Holzbau. La copertura è installata sull' Arch-Tec-Lab dell'Istituto di tecnologia in architettura di Zurigo (ITA). La copertura è composta da 168 travi reticolari in legno, in cui la disposizione delle aste permette di riprodurre una superficie curva e con intensità di aste variabile in funzione degli impianti disposti in quota, come ad esempio i corpi illuminanti, le aperture e l'impianto antincendio. L'integrazione digitale tra analisi strutturale, lavorazione del legno, montaggio delle aste e loro collegamento ha permesso di realizzare questa copertura, composta da 48.624 doghe in legno.

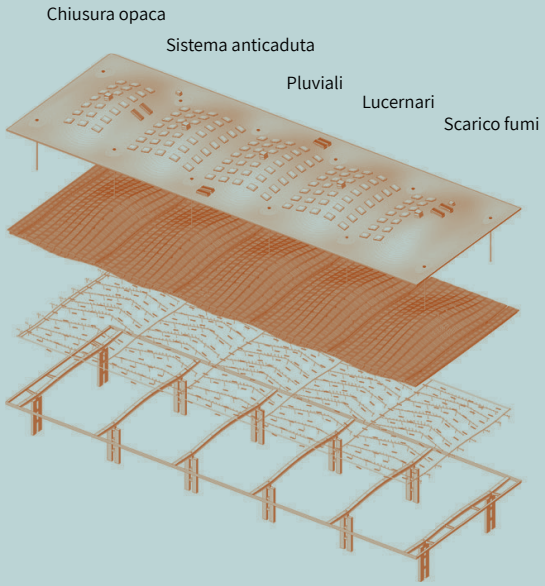
Lo Sequential Roof si può considerare uno dei primi casi di costruzione robotica in legno su larga scala: la struttura è stata realizzata attraverso l'impiego di robot per la lavorazione del legno, per il posizionamento delle aste e per la chiodatura.
L'azienda ERNE AF Holzbau ha sviluppato per questo progetto una nuova configurazione robotizzata, proprio per consentire la variabilità di operazioni (movimentazione elementi, posizionamento, chiodatura). Questa implementazione è resa possibile da un braccio robotico installato su un cavalletto: lo spazio disponibile per il lavoro è un volume pari a 48 x 6,1 x 1,9 m e comprende 3 assi di traslazione nelle direzioni X, Y e Z: lungo l'asse Z è disposto un polso meccanico, dotato a sua volta di 3 assi di rotazione, quindi complessivamente il sistema dispone di 6 gradi di libertà (DOF - Degrees Of Freedom).
Il ciclo di ciascuna doga è composto da 4 differenti fasi: presa, taglio, posizionamento e chiodatura; ciascuna di esse è automatizzata e integrata con le altre; inoltre il sistema robotico esegue anche il controllo qualità e il monitoraggio del taglio e del posizionamento. Ogni ciclo dura mediamente 3 minuti. Poiché non esistono regolamenti che normano questa tipologia strutturale, è stato necessario effettuare delle prove di carico:

In senso orario. Interno del laboratorio Arch-Tec-Lab presso ITA Zurigo; sistema robotico presso ERNE Holzbau per la realizzazione della copertura. GKR - Gramazio Kohler Research



CS
04





sulla base dei risultati ottenuti sono state modellate tutte le travi reticolari. Per la messa in opera è stato selezionato un campione di 16 elementi su cui eseguire il collaudo finale convalidando in tal modo il sistema costruttivo.
La superficie si estende per oltre 2.300 mq ed impiega 168 elementi prefabbricati: ciascun elemento prefabbricato è composto da più aste in legno, le cui dimensioni possono variare e raggiungere una lunghezza massima di 3,17 m. La progettazione del tetto è stata sviluppata con l'impiego di un modello parametrico computazionale, sviluppato appositamente per questo progetto: esso permette di realizzare il modello a partire dai parametri costruttivi e strutturali (la dimensione delle aste, l'ottimizzazione delle sovrapposizioni in legno, il sistema di chiodatura delle aste) e dai parametri della destinazione d'uso (i sistemi di illuminazione naturale e artificiale, il sistema splinker, il sistema di areazione): il modello ha permesso di considerare anche i parametri deri-



Dall'alto. Schemi della trave reticolare in legno e dell'integrazione con gli altri elementi del progetto, quali sistema di rivestimento e impianti; il sistema costruttivo del laboratorio Arch-Tec-Lab di ITA; vista esterna del laboratorio ultimato, da cui è possibile vedere solo la superficie curva e non le travi reticolari, visibili solo all'interno della struttura. GKR

Nella pagina accanto. Vista interna della copertura: nei punti in cui sono inseriti i lucernari e i sistemi di illuminazione artificiale, le doghe sono disposte al fine di permettere l'infiltrazione della luce e l'illuminazione dello spazio sottostante. GKR



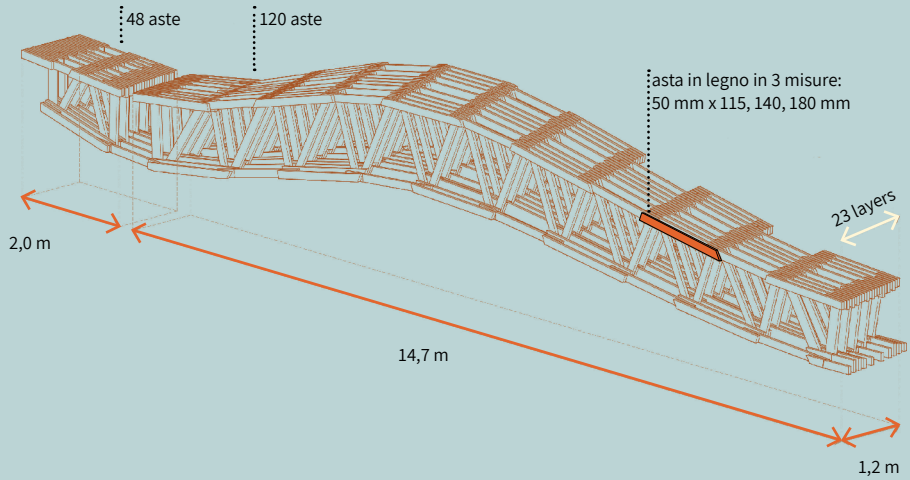
CS
04





vanti dai vincoli imposti dal processo automatizzato di fabbricazione robotica come ad esempio la movimentazione delle aste, la loro sovrapposizione asta dopo asta e la loro manipolazione.
L'impiego di software per il calcolo di questi elementi, ha consentito di ottimizzare la realizzazione degli elementi prefabbricati e di dedicare invece più tempo alla fase di progettazione e programmazione.
L'elemento prefabbricato è composto da 23 livelli, su cui sono disposte e alternate le travi reticolari, composte da aste di dimensione variabile in legno massello, presumibilmente di abete bianco: l'altezza è di 5 cm mentre la lunghezza può essere di 11,5 - 14,0 - 18,0 cm. Ciascuna di esse viene tagliata e posizionata all'interno del sistema della trave reticolare: una volta terminato il posizionamento delle aste di un layer, il braccio robotico inserisce i chiodi nei punti di collegamamenti e prima di passare al montaggio successivo, viene effettuata una verifica sulla disposizione e sulla qualità del collegamento realizzato. L'elemento prefabbricato viene infine trasportato in cantiere e installato, collegando gli estremi della trave alla struttura principale in acciaio.

Dall'alto. Il sistema robotico presso ERNE Holzbau per la realizzazione della copertura, fase di montaggio delle aste in legno; disposizione dell'asta in legno per la realizzazione dell'elemento prefabbricato: dall'immagine è possibile notare anche la parte dell'intradosso con diversa disposizione delle aste, più e meno fitta, per filtrare la luce naturale e artificiale; le prove di carico per l'elemento prefabbricato; schema dell'elemento prefabbricato con dimensioni di massima. GKR

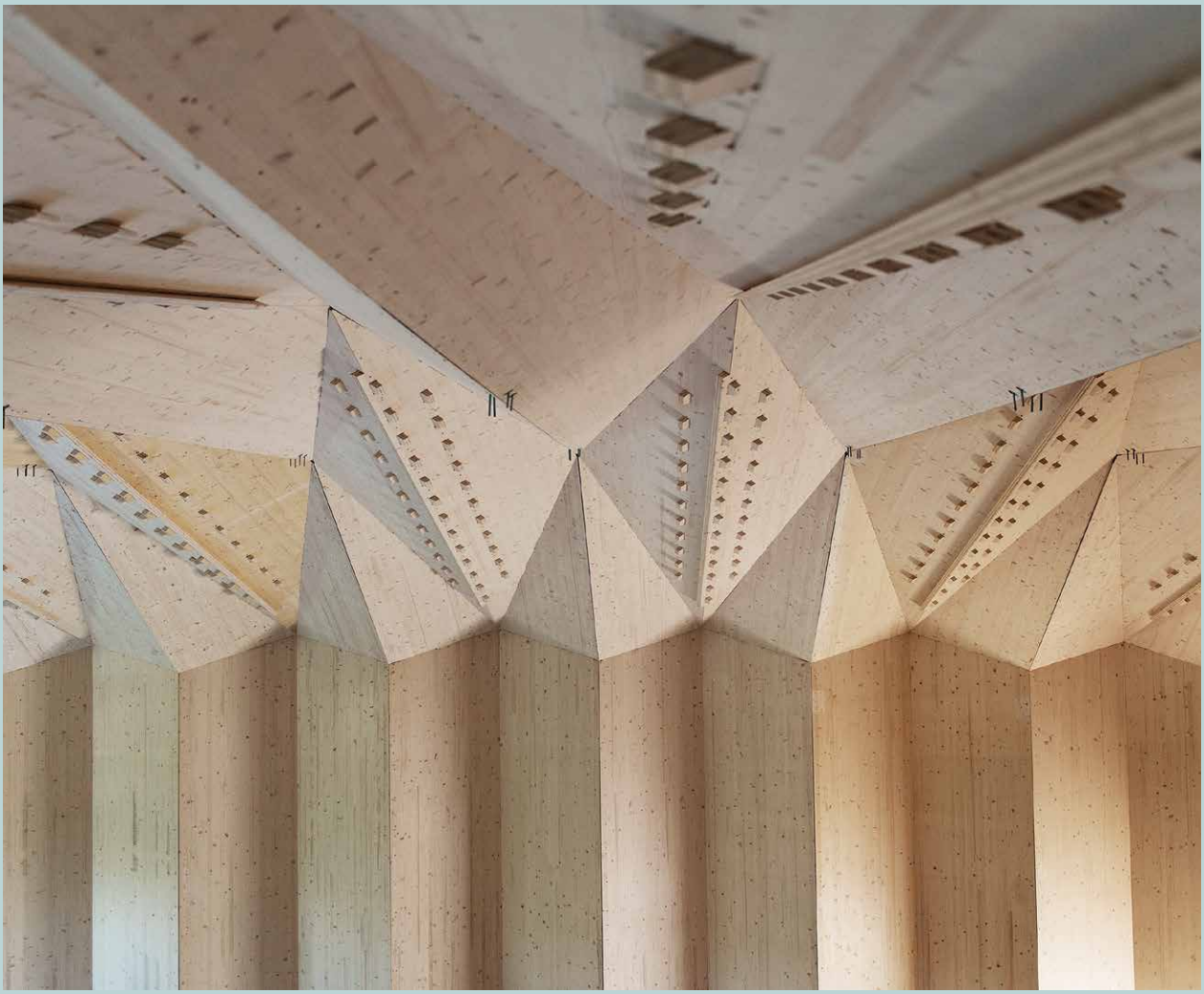






Dall'alto. Fasi montaggio della copertura: si intravedono gli elementi curvilinei in acciaio della struttura principale. L'installazione della copertura avviene tramite la realizzazione dei collegamenti tra le teste degli elementi e le travi di bordo in acciaio. GKR

CS 05 PADIGLIONE VIDY
Losanna, Svizzera 2017
Yves Weinend, Atelier Cube SA



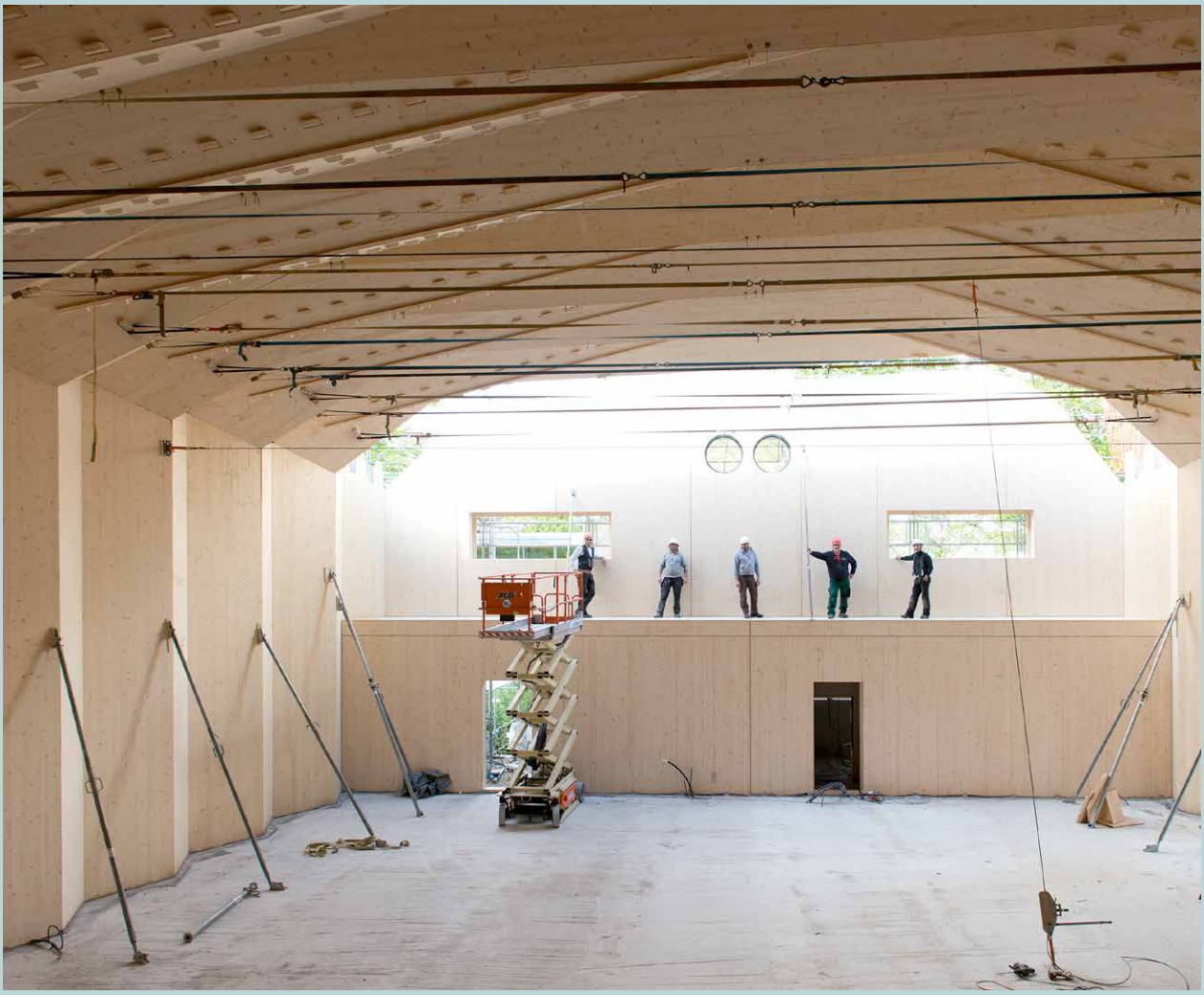
Il padiglione è stato realizzato come ampliamento del Teatro Vidy di Losanna, che raccoglie già altre tre differenti strutture: la sala Charles Apothéloz (386 posti, palcoscenico 15 x 10 m), le sale René Gonzales (100 posti, palcoscenico 10 x 14 m) e La Passerelle (100 posti, palcoscenico 9 x 8 m). Il Teatro Vidy necessitava di un'altra sala per lo spettacolo e che questo spazio potesse essere quanto più flessibile.
Il padiglione è stato progettato dall'ingegnere Yves Weinend, docente presso l'EPFL di Losanna e direttore del laboratorio di ricerca sulle costruzioni in legno IBOIS (EPFL). Il padiglione si estende su una superficie totale di 540 mq e può contenere fino a 250 posti a sedere. Per poter realizzare uno spazio quanto più flessibile e adattabile, la platea è disposta su gradini mobili e reclinabili, che consentono una scena frontale o bifrontale.

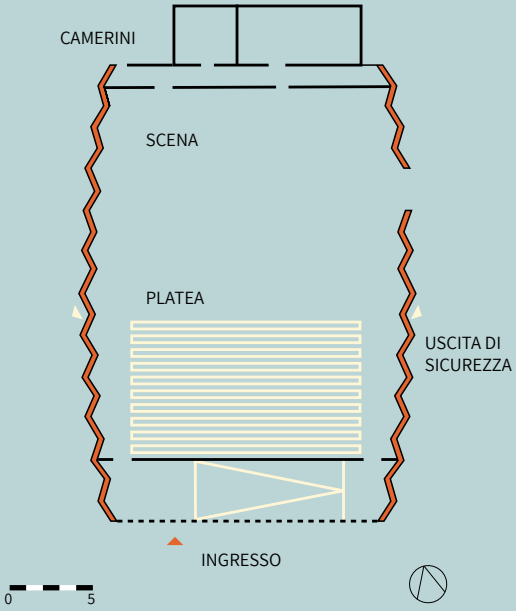
L'edificio è stato realizzato interamente con una struttura in legno in pannelli CLT, assemblati tra loro senza l'impiego di connettori metallici: questo è stato possibile attraverso lo sviluppo di un giunto legno-legno che richiama il funzionamento del giunto tenone-mortasa. Il modello strutturale complessivo riprende invece il meccanismo di un origami, la cui rigidità è conferita dalle pieghe. Questo sistema fu già impiegato nella Cappella temporanea di Saint Loup (2008) dallo stesso Weinand: in quel caso però furono utilizzati come connettori dei profili metallici per connettere i pannelli in legno. Per il padiglione del Teatro Vidy è stato invece impiegato un sistema a doppia pannellatura, che garantisce l'incastro delle singole facce della struttura, mantenendo rigido il sistema complessivo.

Yves Weinand con il gruppo di ricerca IBOIS e in collaborazione con Blumer-Lehmann, ha progettato una struttura i cui portali si possono estendere dai 16 ai 20 m, attraverso l'impiego di un sistema a doppia pannellatura (45 + 45 mm). Nell'intercapedine di 300 mm interposta tra i due pannelli, è stata insuflatta ovatta di cellulosa, ricavata dal riciclaggio di carta da giornale, contribuendo a migliorare l'isolamento acustico del padiglione.

Sopra. Vista interna del padiglione durante il cantiere, ultimata la realizzazione della struttura portante: nella parte superiore sono visibili le teste dei tenoni. Ilka Kramer

Nella pagina accanto, la struttura ancora in fase di costruzione e vista sugli spazi che saranno dedicati alla scena e ai camerini restostanti. La struttura dell'edificio viene rivestita esternamente con tavole in legno verniciate, disposte secondo l'inclinazione dei pannelli portanti. Ilka Kramer



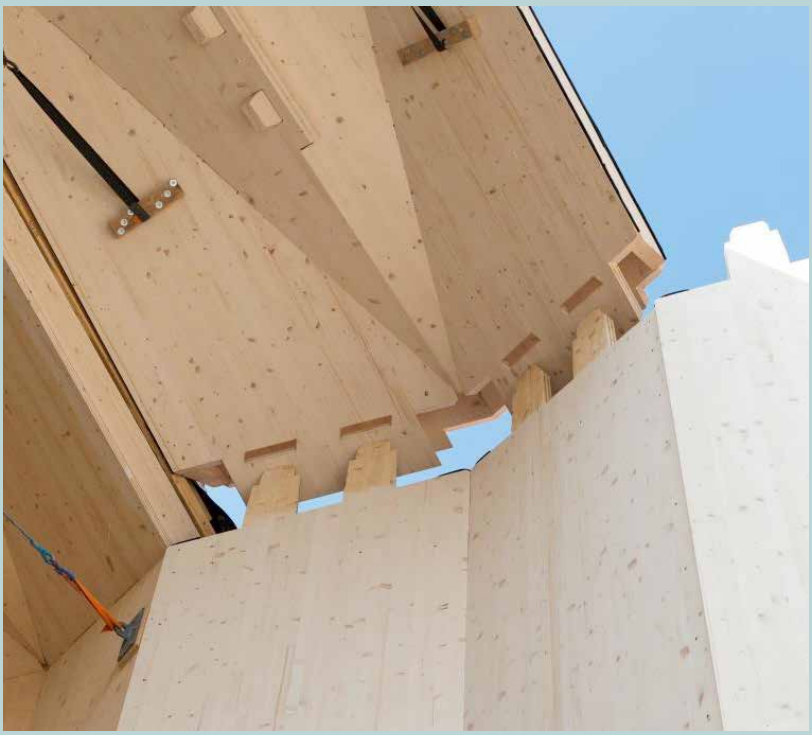

CAMERINI
SCENA
PLATEA
USCITA DI
SICUREZZA
INGRESSO
0
5



CS 05







Fasi di montaggio dell'arco di un telaio sugli elementi di elevazione verticale: ciascun elemento è composto da un doppio pannello con intercapedine di 300 mm. La fase assemblaggio dei giunti tenone-mortasa è stata la più delicata durante il cantiere. Ilka Kramer

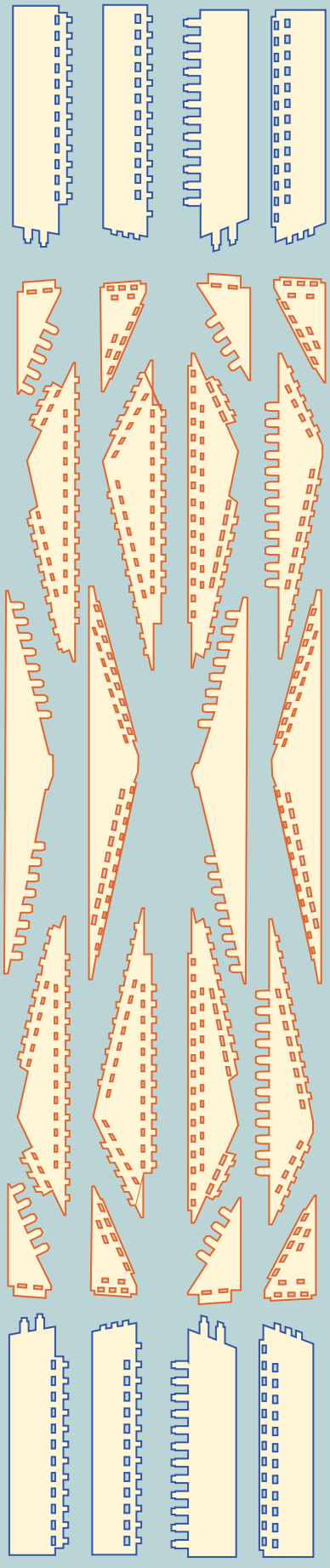
Il sistema costruttivo è stato realizzato con pannelli CLT di abete locale dello spessore di 45 mm. Il sistema si basa sull'impiego di un elemento composto da due pannelli: gli elementi sono collegati tra loro mediante giunti legno-legno. Gli elementi tra loro connesi compongono il sistema del portale. La struttura è composta complessivamente da 11 portali, le cui parti di elevazione verticale e di copertura, sono state preassemblate in officina. I pannelli di elevazione misurano circa 7,5 m mentre l'elemento di chiusura orizzontale varia in lunghezza (da 18,6 m a 20,9 m) e in altezza (da 3,33 m a 3,85 m), mantenendo costante la propria larghezza (2,6 m). Per poter trasportare i pannelli i cantiere è stato necessario utilizzare mezzi eccezionali: durante il montaggio gli elementi sono stati movimentati con una gru e i collegamenti sono stati eseguiti manualmente direttamente in quota. La precisione della lavorazione dei giunti è stata per questo motivo un fattore essenziale al fine di non prolungare i tempi di cantiere e minimizzare gli interventi in corso d'opera.
Ciascun portale è composto da 14 elementi a doppia pannellatura, le cui dimensioni però non sono costanti. Nella progettazione di questi elementi, la fabbricazione digitale ha contribuito a realizzare un modello parametrico a partire dalle suddette variabili. Ha permesso di elaborare la corretta morfologia dei collegamenti in funzione della struttura e dei vincoli imposti dagli strumenti utilizzati per la lavorazione materiale, più precisamente dal grado d'inclinazione del mandrino della macchina CNC dell'azienda Blumer Lehmann.
Sono stati realizzati complessivamente 308 pannelli in CLT, ciascuno dei quali con una specifica dimensione e una

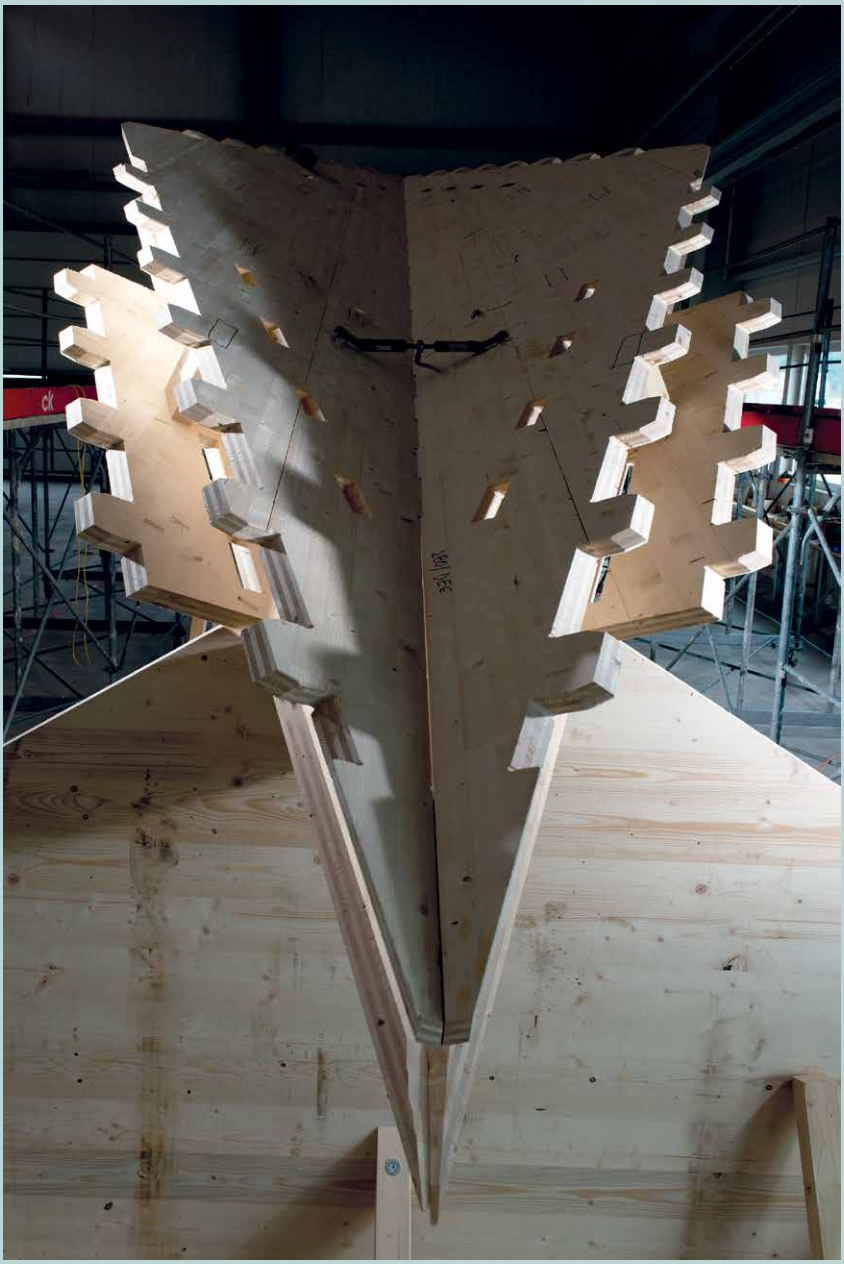




Gli archi dei portali (le chiusure orizzontali) sono stati assemblati in officina, ciascuno composto da 8 doppi pannelli inclinati e incastrati: la lunghezza di un arco varia dai 18 ai 20 m. Per il trasporto in situ sono stati utilizzati mezzi speciali. Blumer Lehmann
La sala è stata dipinta di nero per impedire alle luci di riflettere durante gli spettacoli: inoltre il sistema della doppia pannellatura, l'impiego di ovatta di cellulosa e la tipologia di giunto legno-legno, hanno contribuito a migliorare le prestazioni di isolamento acustico dell'ambiente interno dall'esterno. Ilka Kramer

CS 05





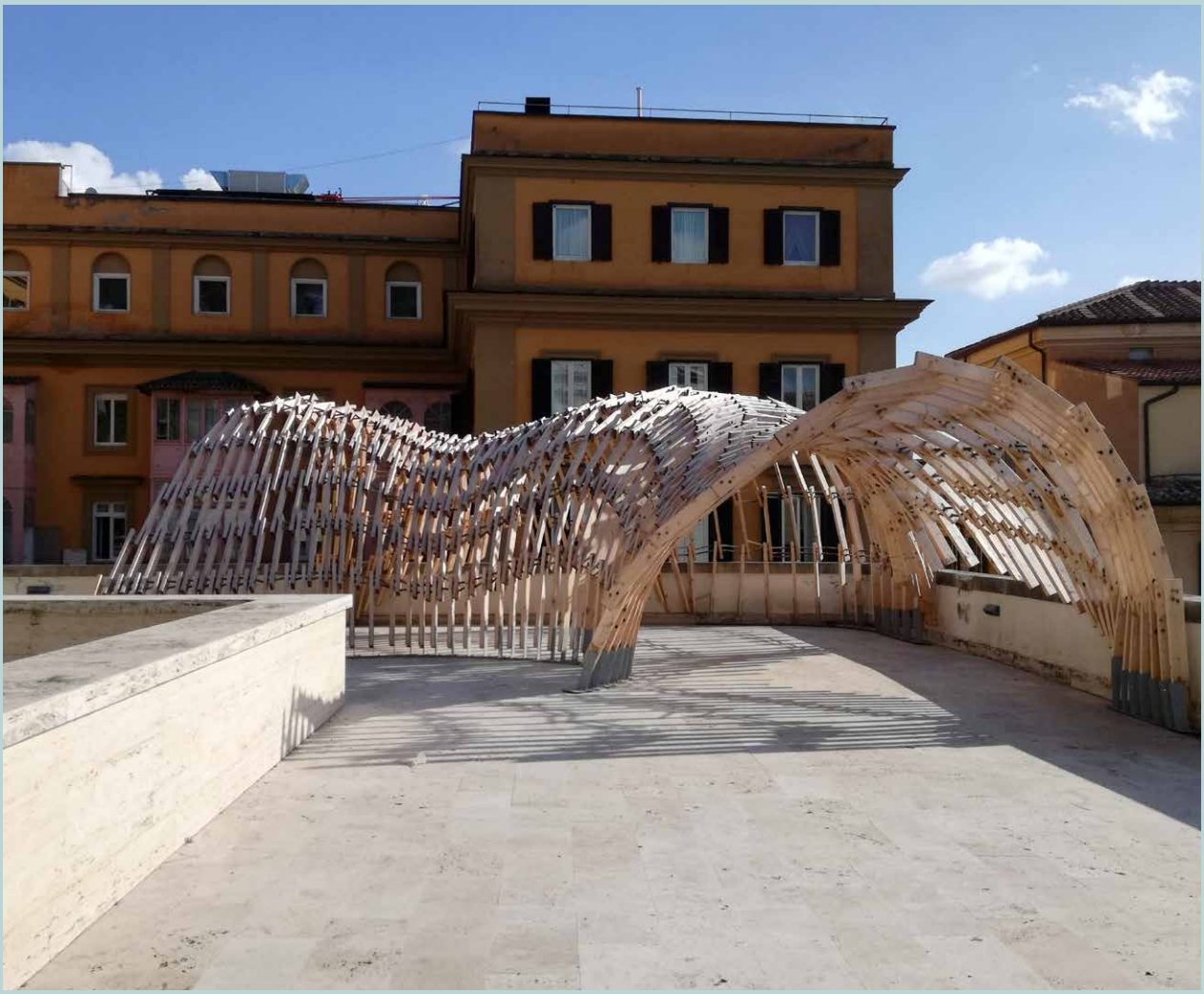
particolare disposizione delle mortase e dei tenoni, quindi delle forature e degli elementi di inserimento.
Il giunto è stato progettato per collegare i pannelli disposti sulla stessa superficie, quindi interna o esterna)e allo stesso tempo connettere i pannelli disposti su piani differenti: nella copertura ad esempio i pannelli esterni dispongono di tenoni che si collegano anche ai pannelli dello strato interno. Per questo motivo si distinguono due tipologie di tenoni: quelli con inserimento singolo (che si incastrano su un pannello disposto sullo stesso piano) e quelli con inserimento doppio (che si incastrano su pannelli del piano differente). Il tenone con doppio inserimento ha una sezione di dimensione maggiore: tale sezione si rastrema alla punta, fino a raggiungere la dimensione pari alla sezione del tenone a inserimento singolo. Questa variazione si ripercuote anche sulla dimensione delle mortase.
La morfologia dei collegamenti, vista la sua variabilità, è molto complessa e i processi di fabbricazione digitale hanno contribuito a trasmettere le informazioni del modello digitale, elaborate attraverso algoritmi matematici, direttamente alla macchina per la lavorazione materiale.



Nella pagina accanto. Pannelli interni ed esterni di un telaio: in blu i pannelli per gli elementi di elevazione verticale; in arancio gli elementi per la chiusura orizzontale. Ciascun elemento ha una propria dimensione, tenoni e mortase di dimensioni e posizioni variabili. IBOIS
Modello del giunto tra i pannelli esterni e interni della chiusura orizzontale. IBOIS

Vista interna della chiusura orizzontale assemblata: le teste dei tenoni sono visibili e sporgono rispetto la superficie del pannello di circa 2 cm. Ilka Kramer

CS 06 GRADUAL ASSEMBLIES
Villa Maraini, Roma, Italia 2018
Gramazio Kohler Reserach



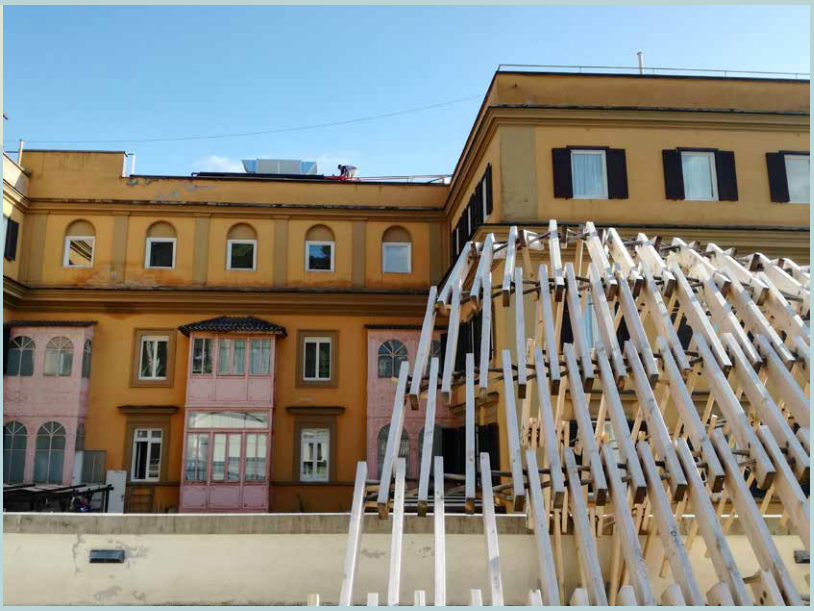
Gradual Assemblies è il progetto sviluppato all'interno del Master of Advanced Studies in Architecture and Digital Fabrication presso l'ETH di Zurigo, dall'unità di ricerca di Fabio Gramazio e Matthias Kohler. Ogni anno all'interno del corso del master viene sviluppato un progetto per sperimentare i sistemi e gli strumenti della fabbricazione digitale, attraverso l'integrazione nel processo costruttivo di uno o più bracci robotici. Negli anni scorsi ad esempio sono stati sviluppati progetti con l'impiego del robot per la disposizione di trefoli metallici nel progetto Minijammed 2017 (dalle ricerche precedenti nel progetto Jammed Architectural Structures), per la il taglio e la disposizione di elementi in legno nel Robotic Pavilion 2016, per la disposizione di elementi standard come i mattoni secondo un particolare disegno per il Brick Labyrinth 2017.
Nel 2018 è stato sviluppato un progetto in cui la fabbricazione digitale ha consentito di sfruttare due bracci robotici non solo per l'assemblaggio e il taglio degli elementi, ma anche per la realizzazione delle connessioni.
Gradual Assemblies è una gridshell composta da aste in legno di identica dimensione, connesse le une con le altre da connettori in legno: elementi metallici sono stati utilizzati esclusivamente come base della struttura.
Le aste sono state lavorate presso il laboratorio dell'università e assemblate tra loro per realizzare dei portali prefabbricati, che sono stati a loro volta montati in opera direttamente sulla terrazza di Villa Maraini, Roma. Il progetto della gridshell è stato ottenuto grazie alla combinazione tra la progettazione computazionale e l'impiego di bracci robotici per la produzione e il montaggio.

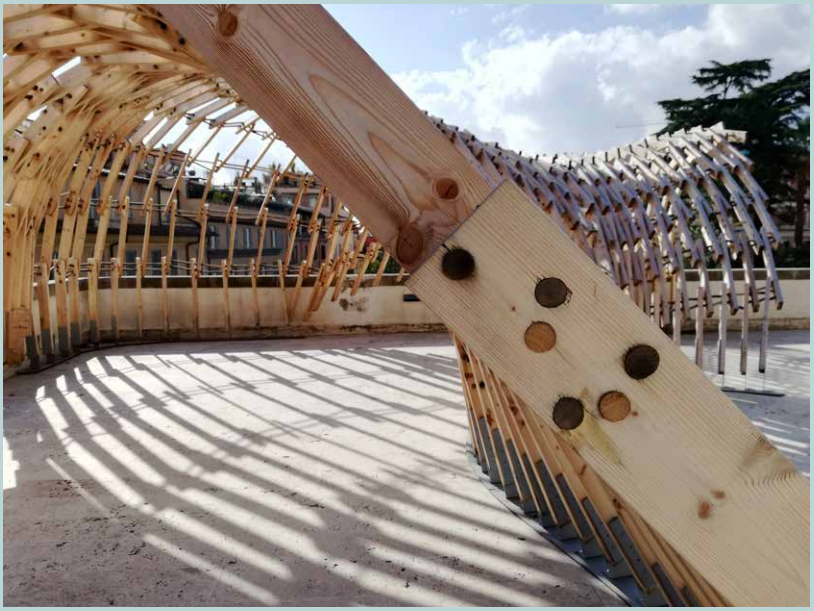
La gridhsell Gradual Assemblies installata sulla terrazza di Villa Maraini a Roma (2018).

Dettaglio della gridshell: la variabilità della disposizione delle aste in legno e dei connettori in legno, è molto ampia. Oltre al numero degli elementi impiegati, è da notare anche l'inclinazione che essi assumono all'interno del sistema e, conseguentemente, anche la direzione e disposizione dei connettori muta.



CS 06







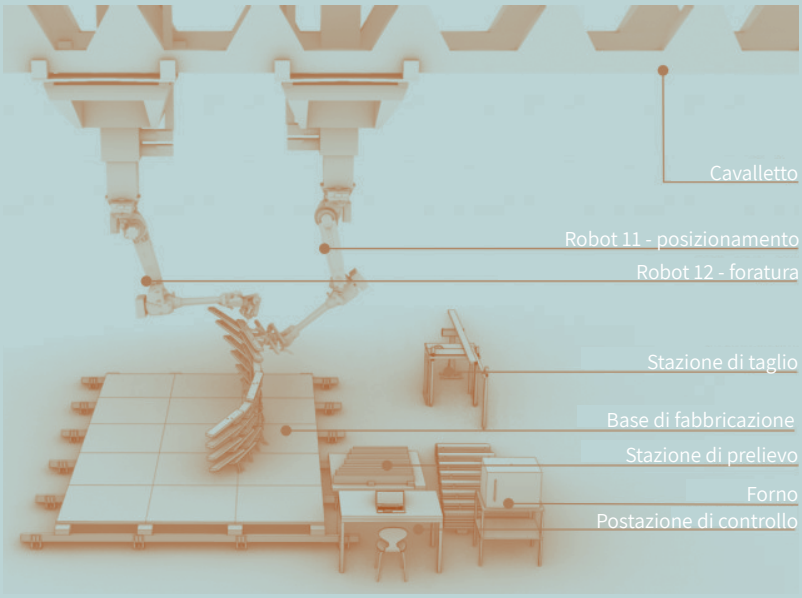
Le doghe in legno sono collegate mediante connettori lignei. Le forature per l'inserimento dei tasselli sono state eseguite da un braccio robotico, mentre l'inserimento dei tasselli è stato eseguito a mano. Un limite di questo sistema è stata la posizione della foratura, eseguita in alcuni punti senza rispettare la distanza dal margine dell'elemento, creando quindi dei punti più sensibili, che nel corso del tempo hanno presentato anche fenomeni di rottura. A terra le piastre per realizzare il basamento della gridshell, costituisce l'unico punto in cui è utilizzato il metallo.

Nella pagina accanto. La produzione di uno dei 22 moduli, prefabbricati e assemblati direttamente in laboratorio presso ETH Zurigo (2018). Un braccio dotato di pinze esegue il posizionamento della doga, l'altro braccio con un solo mandrino, esegue la foratura: i punti in cui le pinze afferrano la doga sono funzionali ai punti in cui deve essere eseguita la foratura. Schema della postazione di lavoro. Gramazio Kohler Research

La struttura è composta da più di 700 doghe in larice di identica dimensione: il collegamento tra le doghe è stato realizzato con l'impiego di tasselli preessicati in forno prima del montaggio, presumibilmente in faggio, per sfruttare le proprietà di dilatazione e quindi di irrigidimento del giunto. La peculiarità del progetto consiste nella realizzazione dei giunti, per i quali sono stati impiegati almeno 2.700 tasselli: questo sistema di collegamento è stato ottenuto grazie all'impiego di un modello computazionale integrato con bracci robotici, in grado di leggere correttamente le differenti informazioni su ciascuna doga. I bracci robotici infatti operavano simultaneamente ed eseguivano due attività differenti: il primo con delle pinze afferrava una doga e la disponeva all'interno del telaio (operazione spaziale), il secondo invece eseguiva la foratura per l'inserimento del tassello in faggio (operazione materiale). Ciascuna doga presenta 6 punti di foratura, ognuno dei quali con una posizione e un'inclinazione particolare: tale operazione avrebbe richiesto molte più ore di lavoro se si fosse eseguita manualmente, senza l'impiego di bracci robotici, in grado di leggere immediatamente i comandi digitali del modello computazionale della gridshell.
Il montaggio complessivo è invece il risultato della colloborazione tra due bracci robotici e il lavoro dell'uomo: l'inserimento dei tasselli è stato infatti realizzato manualmente, mentre la preforatura è stata eseguita con i robot.
In laboratorio sono stati preassemblati 22 moduli della struttura, successiva-



mente trasportati in cantiere e collegati gli uni agli altri: la produzione degli elementi e dei moduli ha richiesto circa venti giorni, mentre il montaggio una settimana.
Questa costruzione descrive un importante passaggio nell'interazione uomo-macchina: il braccio robotico non si limita esclusivamente a movimentare i pezzi in uno spazio, impiego diffuso soprattutto nel settore industriale, ma interviene puntualmente su di essi, collaborando con altri robot e con l'uomo.
La concezione e lo sviluppo strutturale del Gradual Assemblies sfrutta le proprietà della materia prima del legno, quali larice e faggio, e quelle l'automazione, ottimizzando il processo costruttivo, determiando così un innovativo impiego del legno.



CS 07 RIFUGIO OBERHOLZ
Obereggen (BZ), Italia 2017
Peter Pichler Architecture e Pavlov Mikolajkac



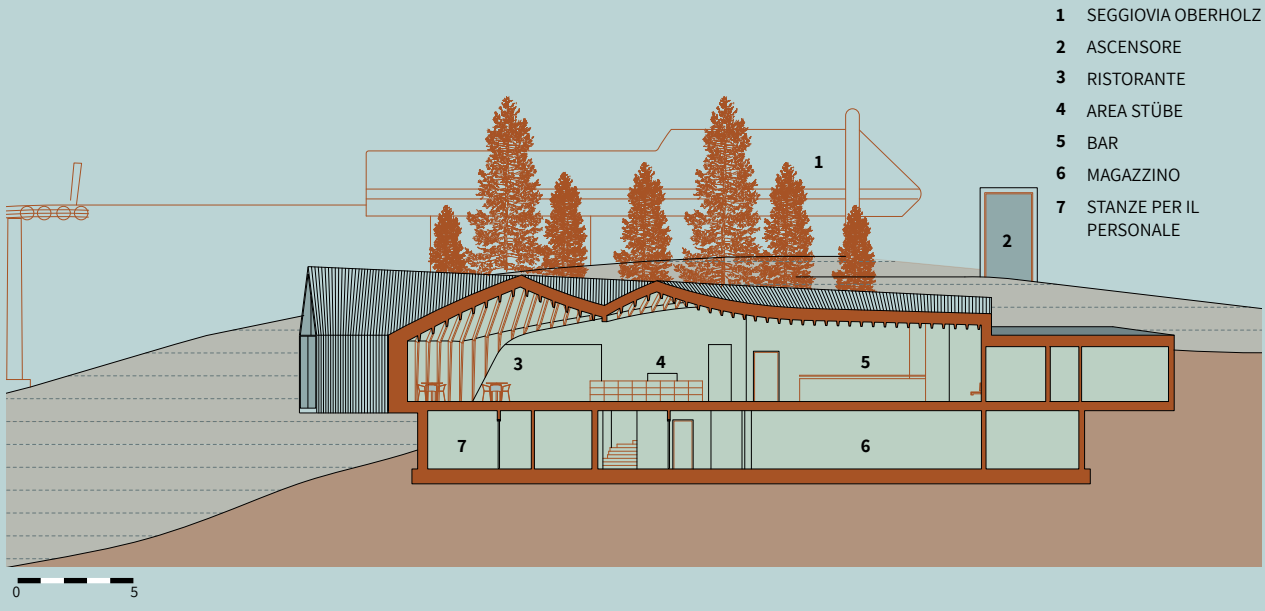
Alla quota di 2096 m di altitudine, nella località di Obereggen (BZ) è stato costruito ai piedi della seggiovia Oberholz un rifugio, progettato da Peter Pichler Architecture e Pavlov Mikolajkac, vincitori nel 2015 del concorso per la costruzione del rifugio.
L'edificio è situato nei pressi del gruppo montuoso Latemar, sul fianco rivolto a ovest. Parte dell'edificio è scavato nella montagna, mentre il piano fuori terra si affaccia sul paesaggio circostante: a sud un'ampia terrazza per il ristoro, mentre in direzione ovest il rifugio si ramifica in 3 corpi a sbalzo.
Il rifugio è formato da due piani: quello seminterrato, con le camere per il personale, i servizi igenici e il magazzino, e il piano superiore con le aree di ristorazione. Questo piano è fortemente caratterizzato dalla struttura in legno dell'edificio, che resta completamente a vista: la disposizione degli elementi strutturali contribuisce ad accentuare lo sviluppo del corpo dell'edificio, che si ramifica in 3 parti sulla Val d'Ega. Ciascuno di essi è rivolto verso le tre montagne più importanti della zona: il Corno Bianco, il Corno Nero e il Mendel. I tre corpi si sviluppano in maniera curvilinea e sono aggettanti rispetto l'intero edifico, per accentuare la percezione del visitatore l'immersione nel paesaggio circostante. Ad accrescere questo effetto è anche la scelta del sistema costruttivo, lasciato a vista. La struttura è composta da portali in legno lamellare di abete rosso, la cui disposizione è molto fitta, poiché la distanza tra due elementi non supera i 90 cm.

Vista interna di una delle sale del rifugio, con l'ampia vetrata che si apre sulla Val d'Elga.

Nella pagina accanto. Viste esterne del rifugio, dettaglio dei corpi a sbalzo con affaccio sulla Val d'Ega, alle spalle si intravede il gruppo montuoso Latermar; vista della copertura a falde: la chiusura superiore segue l'andamento curvilineo dei tre corpi e accentua lo sguardo sul paesaggio circostante. Questo paesaggio è visibile per chi scende dalla seggiovia.
Sezione AA dell'edificio: un ascensore collega direttamente la seggiovia con il ristorante interno del rifugio, dove al piano terra sono collocati i servizi e le stanze per il personale, mentre al primo piano le sale per la ristorazione. Pichler Architecture e Pavlov Mikolajkac







1 SEGGIOVIA OBERHOLZ
2 ASCENSORE
3 RISTORANTE
4 AREA STÜBE
5 BAR
6 MAGAZZINO
7 STANZE PER IL PERSONALE

CS 07



Vista interna sui tre corpi aggettanti: il sistema costruttivo realizzato con portali in legno ravvicinati, accentua l'andamento curvilineo degli spazi e risalta le aperture sul paesaggio circostante.
Pianta del primo piano dell'edificio, in cui sono distribuite le attività della ristorazione: la stube e il bar nelle zone centrali, i magazzini e la cucina nelle aree a ridosso della montagna, realizzate interamente in calcestruzzo armato; le aree per la ristorazione sono invece distribuite nei tre corpi a sbalzo, caratterizzati dalla struttura in legno. A sud-est l'ampia terrazza che si appre sulla Val d'Elga.





La disposizione e la morfologia dei portali contribuisce ad accentuare lo sviluppo dello spazio interno verso il paesaggio esterno, creando una cornice attorno alle grandi vetrate poste sulle teste di ciascun braccio.
Anche la copertura si ramifica seguendo l'andamento dei tre corpi, ciascuno dei quali è chiuso da una copertura a due falde. Un importante contributo per lo sviluppo della chiusura superiore è stato dato dall'azienda LignoAlp (del gruppo Damiani Holz), la cui sede si trova a Nova Ponente, quindi nelle zone limitrofe. Specializzata nella produzione di strutture in legno, LignoAlp ha realizzato e installato le strutture in legno, sviluppando un sistema prefabbricato ad hoc per agevolare le operazioni di montaggio in situ. In quattro mesi di cantiere sono state realizzate le strutture in calcestruzzo armato del piano seminterrato e sono state installate le strutture in legno prefabbricate (che comprendono dai 4 agli 8 portali), realizzate in officina e già dotate di sistemi di pannelli di rivestimento interno e impianti. In opera sono stati eseguiti i collegamenti tra le parti con l'impiego di carpenteria metallica: sono state utilizzate delle travi curvilinee lunghe 12 metri sui punti di avvallamento del tetto, su cui i portali in legno poggiano. Infine è stato realizzato il rivestimento esterno in doghe di larice.

In officina, la prefabbricazione dei portali, assemblati in moduli di differenti dimensione. Ciascun modulo è composto da: portali in legno lamellare di abete rosso; pannelli di tamponamento interno in abete (20mm) con elementi in poliuretano per isolamento acustico interposto tra i portali; nell'intercapedine della chiusura superiore sono stati predisposti gli impianti e in seguito sono stati assemblati gli altri materiali (pannelli OSB, barriera al vapore, pannello isolante, membrana impermeabilizzante, travetti e correnti in legno per rivestimento esterno della copertura. Il rivestimento esterno è stato realizzato in situ con doghe in larice (nell'immagine sopra è riportato il mockup della tecnologia impiegata. LignoAlp
Montaggio in cantiere dei portali in legno prefabbricati, collegati al basamento in calcestruzzo armato. I collegamenti dei portali sono stati realizzati con l'impiego di carpenteria metallica. LignoAlp





Note

1 Una curiosità sul legno da ardere e le tecnologie sviluppate per sfruttare questa risorsa, e come l'architettura abbia offerto risposte: il legno di quercia o di latifoglie, brucia lentamente, mentre quello di conifera brucia più rapidamente. Il fuoco che costituisce fonte di energia, riscaldamento e cottura del cibo, necessita quindi di essere controllato in maniera differente: nei climi temperati, dove è diffuso il latifoglie, si sviluppa il camino all'aperto e l'uso della brace, mentre nelle zone fredde si diffonde l'uso delle stufe, utili a prolungare la combustione del legno di conifera. "Ne deriva che la qualità del legno, la quantità disponibile e le dimensioni ottenibili con le normali utilizzazioni, finiscono per determinare il tipo di focolare e quindi anche il modo di fare cucina, cioè le gastronomie locali. Nei caratteristici trulli della Murgia Pugliese la cucina è quasi totalmente occupata dal camino, che impegna talvolta un'intera stanza munita di canna fumaria centrale che costituisce il tipico pennacolo; un fatto funzionale è diventato schema architettonico" (Ervedo, 1979).

2 Potenzialità nello sviluppo della materia, come nel caso del legno lamellare, e per lo sviluppo di elementi caratterizzati da particolari morfologie, come nel caso dei pannelli in legno.

3 Ad esempio, le popolazioni nomadi della Mongolia che realizzavano le tende a Yurta, con una struttura in legno e rivestita con pelli animali. La Yurta è costruita per sostenersi da sola, senza ancoraggi al terreno o corde: non vengono usati né chiodi né viti nell'intero processo di produzione e montaggio.

4 La Serenissima impiega il legno nel settore nautico, edile e dell'arredo: tale risorsa doveva essere gestita in maniera regolare, al fine di non esaurirla e di garantirne una produzione continua e costante. Risale al 1475 uno dei più antichi e importanti regolamenti per la selvicoltura e la gestione delle foreste: Venezia definiva una serie di comportamenti e obblighi per conservare "le comugne" (i boschi comunali affidati in uso perpetuo ai residenti dei territori locali) impedendo di tagliare gli alberi troppo con meno di 10 anni, di praticare il ripristino forestale e di piantare o seminare roveri, perché utili nei cantieri navali (Viola, 2011).

5 La tipologia della coperture a carena di nave è utilizzata soprattutto negli edifici pubblici. Tra i casi più noti nella regione del Veneto ad esempio si ricorda la Basilica Palladiana di Vicenza e la Chiesa di San Fermo Maggiore a Verona, la copertura a carena multipla è stata recentemente portata alla luce da un complesso intervento di restauro.

6 Poste ad una distanza non superiore ai 2 metri.

7 Una soluzione ingegnosa nasce spesso nel momento in cui si deve risolvere un problema: ecco dunque che la scarsità di legno ha portato a sviluppare sistemi in cui l'impiego della quantità di legno era ridotta al minimo, sfruttando al massimo tutte le potenzialità della materia. La capriata, ad esempio, è una soluzione sviluppata in epoca tardo romana che trova ampio sviluppo durante l'Alto Medioevo (Barbisan, Guardini, 2005, p. 22) poiché permetteva di ridurre l'impiego di legno, a quel tempo difficile da reperire.

8 Si tratta di Paesi in cui la risorsa non è presente o poco utilizzata come in Italia e nel Sud della Francia, e Paesi che hanno subito una forte deforestazione, a causa dell'industria navale e civile (Barbisan, Guardini, 2005, p. 41), come in Inghilterra.

9 L'assemblaggio di tavole è una tecnica che risale al Trecento e viene associata alla figura di Fra' Giovanni degli Eremiti: egli aveva realizzato travi per una copertura ottenute dall'assemblaggio di tavole disposte a coltello e connesse tramite cavicchi in legno.

10 Intervento del prof. Davide Pettenella, in occasione di AEDIFICA 2018, Vicenza.

11 Per approfondire si veda paragrafo 3.1 La classificazione degli elementi in legno.

12 Per approfondire si veda paragrafo 3.5 Gli strumenti per la lavorazione del legno.

13 Il contesto geografico e il clima incidono sulla crescita delle piante, quindi piante anche della stesse specie, si comportano in maniera differente a seconda del luogo in cui sono cresciute.

14 Per approfondire si veda paragrafo 3.7 Sostenibilità, durevolezza, durabilità.

15 Per approfondire si veda paragrafo 3.8 Prospettive di sviluppo.

16 Per approfondire si veda paragrafo 3.9 Headmade.

17 "Le macchine per fabbricare i chiodi trovano la loro origine nell'Inghilterra. In questo parse dal 1790 al 1852 vennero conseguiti più di 50 brevetti di privativa per macchine impiegate in questa lavorazione. Nel 1809 funzionano macchine automatiche per la produzione di chiodi. Alla fine del secolo XIX la fabbricazione è affidata ai cilindratoi. Ma merita ricordare che la produzione di questi manufatti vede l'impiego di una serie di macchine, le quali fanno dell'intero processo uno dei primi a ricevere completa automatizzazione. Dalle scuotitrici delle matasse del filo di ferro ai cilindratoi, alle tranciatrici, alle macchine a quattro cilindri per fare le punte, ai buratti per la pulitura, l'intervento dell'operatore è ridotto al minimo" (Marchis, 1994, p. 211).

18 La prima lavorazione era eseguita direttamente in situ da diversi operai, soprattutto per agevolare il trasporto della materia dove non era possibile ad esempio sfruttare il corso di fiumi per il trasporto in segheria. Nel corso degli anni, migliorando le vie di comunicazione e i mezzi per il trasporto, è stato possibile trasportare i tronchi e lavorarli in ambienti protetti: da qui hanno iniziato a svilupparsi una serie di utensili e macchine utensili per le operazioni di prima lavorazione.

19 La certificazione CE comporta la verifica di resistenza meccanica, sicurezza antincendio, sicurezza messa in opera, sicurezza in vita d'uso. A questi parametri si aggiungono le prove per resi-

stenza termica e il comportamento acustico dei prodotti: le procedure per certificare un prodotto durano in media un anno (Giachino, 2013, p. 929).

20 UNI 3517:1954. Nomenclatura dimensionale degli assortimenti legnosi di produzione nazionale. La norma è stata ritirata senza sostituzione del 2013 ma fornisce una classificazione ancora utilizzabile per distinguere i prodotti in legno.

21 Il legno tondo è ottenuto dalla scortecciatura e dalla rimozione del cambio: in opera restano le parti del durame e dell'alburno: la corteccia e il cambio sono utilizzati come combustibili.

22 Le travi Uso Trieste e Uso Fiume sono ottenute tramite il taglio longitudinale del tronco lungo quattro facce con smussi ammessi fino al 90% della sezione ed eccentricità fino al 10%, per Uso Fiume, e 20% per Uso Trieste (Giachino 2013, p. 82). Il taglio nelle travi ad Uso Fiume è lineare e mantiene la sezione costante, invece in quelle ad Uso Trieste la squadratura è parallela alla conicità del tronco, per questo motivo le fibre non vengono interrotte. Per approfondire questo argomento, si può consultare pagina web www. traviuf.it, a cura del Comitato tecnico Travi Uso Fiume e Uso Trieste.

23 Con cuore si intende il midollo del fusto, la parte più vecchia e soggetta a spaccature. Premesso che il taglio viene eseguito a quattro fili con sezione rettangolare, la dicitura definisce la posizione del taglio rispetto al tronco e la presenza o meno del midollo nella sezione: il taglio a cuore vivo corrisponde a una sezione con il midollo del fusto centrale; il taglio a cuore spaccato è invece una sezione in cui il cuore è posto su uno dei quattro lati della sezione; il taglio fuori cuore è una sezione in cui il cuore è escluso. Il midollo è la parte più soggetta a fenomeni di spaccatura radiale, per questo motivo l'inclusione o meno nell'elemento determina la probabilità di questa tipologia di fenomeni. Tuttavia, più un elemento è tagliato fuori cuore, più questo è soggetto a fenomeni di imbarcamento: per questo motivo gli elementi tagliati fuori cuore sono utilizzati in composizione con altri, ad esempio per lamellare o elementi giuntati.

24 Per approfondire si veda paragrafo 3.8 Prospettive di sviluppo.

25 In inglese vengono utilizzati perfino due termini differenti per indicare il legno e il legno da costruzione: rispettivamente "wood" e "timber". In riferimento alle proprietà del legno, le latifoglie sono indicate come "hardwood" mentre le conifere come "softwood".

26 Si vedano le origini dei sistemi a capriata nel Tardo Romano e ripresi nel Medioevo, e infine lo sviluppo del legno lamellare.

27 La Serenissima selezionava nella propria riserva boschiva del Cadore i tronchi per la costruzione delle navi e quelli invece destinati all'edilizia, i primi curvi, i secondi lineari (Barbisan, 2008).

28 Tale tecnologia ha in realtà radici in altri sistemi costruttivi simili: Fra Giovanni degli Eremitani ai primi del Trecento impiega una tecnologia basata su tavoloni lignei disposti a coltello; questo sistema è stato successivamente ripreso da P. de l'Orme nel Cinquecento e perfezionato nell'Ottocento da G. Del Russo e da A. Rose Emy.

29 Nel sistema di assemblaggio di tavole, la colla è il legante più diffuso e sostituisce la tradizione tecnica di assemblaggio con chiodi. I sistemi di assemblaggio a secco rappresentano oggi un'alternativa all'impiego di colle, considerate dannose per la salute dell'uomo: tra i sistemi più diffusi si ricorda oltre a quello coi chiodi, l'assemblaggio mediante graffe o mediante pioli in legno.

30 X indica "cross", quindi incrocio, mentre LAM indica "lamella". Questa tipologia di prodotto viene anche indicata con il termine CLT - Cross Laminated Timber.

31 In Italia questa tecnologia è stata impiegata prima nelle zone alpine e successivamente nelle nuove costruzioni in Abruzzo, in seguito al terremoto del 2009. A partire da questi anni, il sistema X-Lam si è diffuso su tutto il territorio nazionale.

32 In riferimento alle norme UNI 14080:2005 per il legno lamellare e UNI 14374:2005 per il legno microlamellare, si possono distinguere differenti comportamenti meccanici: nei casi di flessione, taglio e trazione parallela il microlamellare risponde con prestazioni migliori del doppio rispetto quelle del legno lamellare; nel caso di pressione e torsione le differenze sono minori, ma pur sempre maggiori nel caso del legno microlamellare.

33 In genere realizzato con la specie di okoumè, ma gli strati possono essere diversificati a secondo dell'impiego finale. Esistono anche pannelli compensati con piallaccio esterno in ebano, mentre piallacci interni di specie più economiche e talvolta anche di spessori diversi.

34 La colla è il materiale più utilizzato, ma si stanno sviluppando anche prodotti in cui le tavole vengono assemblate con tasselli e quindi con tecnologie a secco.

35 In Italia la certificazione volontaria EPD (Environmental Product Declaration) è conosciuta anche con l'acronimo DAP (Dichiarazione Ambientale di Prodotto). La certificazione è una tipologia di etichettatura ambientale che fanno riferimento alle norme UNI EN ISO 14020: l'EPD è una dichiarazione di Tipo III - UNI EN ISO 14025.

36 Il brevetto n. 197773 del 1906 rappresenta un elemento che da pilastro continua come trave e viceversa.

37 La prima colla moderna risale al 1928, prodotta a base di urea, attraverso un processo di polimerizzazione a freddo, si otteneva una resina sintetica, conosciuta con il nome di Kaurit (Jeska, Pasha, 2015, p. 40).

38 "La riproposizione del legno, con la tecnologia del lamellare, ha avuto successo soprattutto perché il processo di decostruzione del legno e riassemblamento delle tavole scelte e controllate ha reso omogeneo il prodotto. L'omogeneità - in termine tecnico il contenuto coefficiente di disper-

sione, rapporto fra scarto quadratico e media - ha consentito di calcolare la struttura, in quanto come per gli altri materiali, c.a., acciaio, laterizio, si può fare riferimento a valori caratteristici. Insomma, la possibilità di calcolare il legno lamellare, ne ha legittimato l'uso strutturale" (Laner, 2001, p. 27).

39 L'ebanista è colui che realizza decorazioni come mosaici e incisioni da applicare sui mobili, con legni più o meno pregiati, tra cui anche l'ebano, specie di legno pregiato che conferisce il nome alla professione. Nel caso il mosaico includa altri materiali come l'avorio, si parla di intarsio. Da di Aristide GIANNELLI - Paolino MINGAZZINI - Enciclopedia Italiana (1931), contenuto disponibile su www.treccani.it

40 In Italia esistono due differenti classi merceologiche per distinguere carpenteria (16.10) e falegnameria (16.23). Per approfondire si veda capitolo quattro.

41 "Il problema, per chi volesse cimentarsi nell'uso degli utensili tradizionali rispettando le tecniche di lavorazione delle epoche passate, non è di poco conto, visto che anche la più virtuosa abilità manuale risulterebbe vana in assenza di uno specifico corredo d'appoggio in grado di fermare adeguatamente il pezzo da trattare" (Zanini, 2018, p. 24).

42 Burmek era un'azienda svedese, nata nel 1940 circa ed è stata tra le prime a produrre macchine utensili per la lavorazione del legno: si ricorda ad esempio la prima sega a taglio trasversale automatizzata, SPL160. In seguito l'azienda è diventata BauTech Sweden, e nel 2008 è stata assorbita dalla compagnia Nordiska Truss.

43 Queste macchine sono riconoscibili anche per i colori dell'immagine dell'azienda: la cabina di lavorazione è gialla con bordatura rossa, e carrello per spostamento azzurro. Ancora oggi sono leader mondiali nella produzione di macchinari per la carpenteria lignea.

44 In Inghilterra è stato realizzato un report sull'impiego del legno nelle coperture di strutture per eventi sportivi: TRADA Technology, "Wide-Span Wood Sports Structures", Technical report, TRADA, 2006.

45 Si tratta della Blumer System truss.

46 In Italia esistono una quindicina di aree produttive specializzate nella produzione di mobili, tra cui le più note sono: distretto del mobile imbottito di Forlì, in Emilia Romagna; distretto del mobile di Livenza e distretto del mobile della Brianza, in Lombardia; distretto del mobile classico della Bassa Veronese e il distretto del mobile d'arte di Bassano del Grappa, in Veneto.

47 Il platform frame è l'evoluzione del balloon frame, in cui cambia la modalità di assemblaggio: nel balloon frame vengono realizzate le intere pareti a terra e poi, una volta alzate, vengono collegate tramite la realizzazione dei solai; nel caso del platform frame di procede invece per piani, senza quindi la necessità di utilizzare elementi provvisori.

48 Le prime Norme Tecniche per le Costruzioni vengono emanate il 30 maggio 1972.

49 "L'introduzione della macchine a vapore e la produzione di massa di chiodi hanno standardizzato i processi di lavori, i componenti e le loro connessioni. I nodi in legno fatti a mano come ad esempio quello a coda di rondine non potevano essere riprodotti dalle macchine e sono stati quindi rimpiazzati dai collegamenti in metallo" (Jeska, Pascha, 2015, p. 59).

50 L'azienda svizzera Krüsi sviluppa il primo prototipo di macchina CNC a 5 assi e lo mette in commercio nella fine degli anni Ottanta, con il nome di Lignamatic. Oggi questa linea di prodotti è ancora disponibile sul mercato, con velocità di lavorazione e software più avanzati.

51 Durante le interviste condotte in occasione di XYLexpo (maggio 2018), alcuni produttori di macchine hanno dichiarato che la distinzione tra robot e macchine CNC oggi è superflua, poiché i gradi di libertà di entrambi gli strumenti sono molto simili.

52 Possono verificarsi alcuni fenomeni di spostamento dell'elemento a causa di alcune lavorazione che provocano vibrazioni sul manufatto e sul piano di appoggio, modificando il posizionamento di lavorazione da quello iniziale.

53 "Uncharted Territory – Handheld Cobotic Power Tools in Architecture" workshop a cura di Florian Horsch (Shaper Tools Inc.) e Lukas Semmler (studente di Ingegneria ambientale), ROBARCH 2018, Zurigo.

54 Michael H. Ramagea, Henry Burridgeb, Marta Busse-Wicherc, George Feredaya, Thomas Reynoldsa, Darshil U. Shaha, Guanglu Wud, Li Yuc, Patrick Fleminga, Danielle Densley-Tingleye, Julian Allwoode, Paul Dupreec, P.F. Lindenb, Oren Schermane, "The wood from the trees: The of timber in construction", in Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 68-1, Febbraio 2017, pp. 333-359.

55 Hans Carl von Carlowitz (1645-1714) pubblica Sylvicoltura Eoconomica al fine di descrivere le corrette procedure di gestione delle foreste, poiché occorreva garantire la disponibilità di tale risorsa anche alle generazioni future, prestando attenzione al consumo e riducendo il consumo di legna solo per stretta necessità.

56 Il legno viene classificato anche in Classi di durabilità che indicano infatti, sulla base dell'umidità contenuta mediamente nel legno, la probabilità più o meno elevata dell'attacco da parte di funghi o insetti.

57 La classe di resistenza del legno fa riferimento al valore di resistenza a flessione, indicata come resistenza caratteristica Tale valore viene riportato con differenti sigle: se il legno è di conifera (C), di latifoglie (L), o lamellare (GL); accanto alla sigla viene riportato un numero che corrisponde al valore della resistenza caratteristica (MPa) e infine si indica se il materiale è omogeneo (h) oppure

disomogeneo (c).

58 Marco Lucchetti in occasione di “NTC. Nuove Norme Tecniche per le costruzioni in legno e nuove esperienze di costruzioni e di ristrutturazioni edilizie con il legno”, UrbanPromo Venezia, 21 settembre 2018.

59 Un larice dell’Europa Centrale è differente da un larice siberiano e gli anelli di crescita sono infatti disposti con intensità differente: mediamente in 1 cm di larice europeo si trovano dai 3 ai 5 anelli di crescita, in un larice siberiano se ne trovano dai 14 ai 16. Tale osservazione descrive una crescita differente, ma anche un comportamento meccanico differente: il larice siberiano è molto utilizzato nel settore edilizio, proprio perché oltre alle proprietà naturali del larice di resistere bene all’umidità, la specie siberiana è caratterizzata da un forte grado di omogeneità del materiale.

60 Si tratta della direttiva europea 98/8/CE, entrata in vigore in Italia con il D.Lgs. 174/2000. Le norme nazionali nei paesi del Nord Europa sono ancora più restrittive in materia di impiego di sostanze impregnanti per il legno.

61 La stessa etimologia latina richiama la natura dell’elemento ligneo disposto su superfici inclinate, infatti è molto utilizzato nelle zone ad alta quota soggette a nevicate: dal latino scandula, che deriva da scandĕre e cioè «salire».

62 La stavkirke è una chiesa medioevale tipica della Norvegia, il cui modello è stato diffuso anche in altri paesi del nord Europa, come la Svezia o la Finlandia. La stavkirke è realizzata interamente in legno e il sistema costruttivo è stato ideato per agevolare la manutenzione complessiva.

63 I templi giapponesi vengono sottoposti ad intervento di restauro con cadenze regolari che possono variare tra i 30 e i 50 anni: questo consente di trasmettere di generazione in generazione le tradizionali tecniche costruttive, che si sono conservate così per interi millenni in questa tradizione culturale e che oggi vengono rielaborati ed esportati anche in altri settori edilizi grazie all’impiego di tecnologie digitali.

64 È interessante il progetto di Microtec per la scansione e il monitoraggio di legname.

65 Per approfondire si veda il capitolo uno.

66 Innovazioni fondamentali sono trasformazioni di processo e prodotto che portano novità; le innovazioni adattive sono trasformazioni ereditate da altri settori, che trasferiti in un determinato ambito generano novità nei processi e nei prodotti; infine le innovazioni funzionali ovvero trasformazioni che riguardano il miglioramento delle prestazioni (Sinopoli, 2006). Sinopoli definisce motore dell’innovazione “la spinta a soddisfare un’esigenza o a contrastare una difficoltà, a di rispondere a una situazione di disagio oppure ancora è la volontà è di rispondere ad una modifica del contesto che cambia le regole del gioco e richiede inventiva e nuove soluzioni” (Sinopoli, 2006, p. 21). L’innovazione non è dunque solamente tecnica, ma prima di tutto culturale.

67 Le forze del sisma che agiscono sulla struttura sono proporzionali alla massa dell’edificio. A parità di dimensione, una struttura in legno è più leggera rispetto a una realizzata in metallo o in laterizio (rispettivamente anche del 20% e del 40%): per questo motivo un edificio in legno reagisce diversamente. Il legno infine è un materiale elastico, quindi nel caso di deformazioni è in grado di tornare allo stato iniziale. La ricerca nelle costruzioni di edifici multipiano in legno è rivolta principalmente alla tipologia di giunti utilizzati.

68 La resistenza al fuoco di un materiale è “la capacità portante in caso di incendio, per una struttura, per una parte di struttura o per un elemento strutturale, nonché la capacità di compartimentazione rispetto all’incendio per gli elementi di separazione sia strutturali, come muri e solai, che non strutturali, come porte e tramezzi.” (DM 09/03/2007). La resistenza è indicata su ciascun prodotto con la sigla REI (stabilità-tenuta-isolamento termico). La resistenza dipende dalla tipologia di struttura e il valore riportato indica i minuti entro i quali riesce a mantenere la propria capacità portante. La reazione al fuoco invece è il grado di partecipazione di un materiale combustibile al fuoco, e viene indicato sulla base di 5 classi. Il legno partecipa all’incendio, brucia lentamente, ma il legno non ancora carbonizzato mantiene intatte le capacità meccaniche: la combustione degli strati esterni pertanto contribuisce a mantenere intatte le proprietà della struttura, fino a che la sezione portante non è ridotta al minimo.

69 Il potere calorifero del legno varia in funzione al contenuto di umidità e alla specie legnosa. Un valore medio per il legno secco (15% di umidità) è di 4,3 kWh/kg.

70 Council on Tall Building and Urban Habitats, la più importante istituzione internazionale sulle costruzioni di edifici alti, ha pubblicato una ricerca sugli edifici alti in legno nel mondo “Tall Buildings in Numbers Tall Timber: A Global Audit”, giugno 2017.

71 Il Burst 2006 copre 100 mq, mentre il Metropol Parasol ne copre 10.000 mq.

72 Per il Metropol Parasol sono stati prodotti 3400 pannelli in LVL, disposti a griglia su una maglia di 1,50 m, con uno spessore compreso tra i 68-311 mm e una profondità massima di 3 m. La griglia forma una superficie curvilinea che in alcuni punti si eleva fino a 40 m di altezza.

73 Tali combinazioni sono state generate mettendo a sistema 96 variabili di vento e 80 di neve (Jeska, Pascha, 2015, p. 64).

74 “Quando si utilizzano membri composti, le forze che agiscono sulla struttura sono trasferiti attraverso i giunti (sfalsati) tra i singoli segmenti agli altri segmenti che continuano in quel punto. Nel 1920, questo principio ha spinto Fritz Zollinger, ispettore della città di Merseburg vicino a Lipsia, a unire singole tavole o elementi laminati con un motivo a rombi, per formare un guscio reticolare” (Jeska, Pascha, 2015, p. 10).

75 "In un modello parametrico, la forma non è definita da dimensioni specifiche, ma da ruoli specifici che determinano come la forma è configurata in funzione di specifici parametri e come le singole parti si comportano reciprocamente. Il cambiamento di anche un singola punto comporta una modifica complessiva dell'intero sistema per rispondere ad hoc, e questi passaggi nella progettazione sono stati perciò automatizzati" (Keska, Pascha, 2015, p. 64).

76 Otto Frei è noto per i suoi numerosi modelli e plastici con cui era solito provare e sperimentare strutture, come lui stesso affermava in maniera scherzosa: "Non ho costruito molto, ho creato molti castelli nell'aria".

77 Le "Nouvelles Inventios" di Philibert de l'Orme vengono pubblicate nel 1561, un'epoca in cui l'Europa è fortemente influenzata dalle correnti culturali italiane, prima rinascimentali e poi illuministiche. Questo contesto culturale non favorisce la diffusione del trattato di Philibert de l'Orme, che esalta la natura della struttura, in una forma quasi gotica, e che infatti dovrà attendere la metà dell'Ottocento per essere compresa, apprezzata e diffusa. La riscoperta delle Nouvelles Inventions porta alla realizzazione di volte a tutto sesto con la tecnica sopracitata, soprattutto in Francia, come la Halle aux Blés (1782). Sono gli anni in cui viene pubblicata anche l'opera di Giuseppe Del Rosso "Della facile costruzione de' ponti di legno per torrenti e piccoli fiumi", in cui descrive l'impiego di piccoli elementi lignei che, a differenza dell'invenzione delormiana, in questo caso sono disposti di piatto (e non di coltello) e riuniti da graffe in ferro: si considera infatti l'archetipo del legno lamellare (Campa, 2009, p. 110).

78 Per approfondire si veda paragrafo 3.9 Headmade.

79 Gramazio F. e Kohler M. con la propria unità di ricerca hanno condotto fino ad oggi diversi studi sulla composizione e l'assemblaggio di telai lignei, alcuni di questi: Spatial timber assemblies (2016-2018) in cui il braccio robotico posizionava le aste, Complex timber structures (2012-2017) in cui la foratura era svolta meccanicamente, ma il trapano era fissato e la movimentazione riguardava solo l'asta da installare; Robotic Pavilion (2016) e Topology Optimization (2015) in cui il robot dispone le aste, le cui teste sono state opportunamente fresate in base all'inclinazione della propria disposizione.

80 A. Eisenhardt, M. Vollrath, K. Waechter & T. Irowetz, O. D. Krieg, A. Mahmutovic, P. Meschendoerfer, L. Moehler, M. Pelzer, K. Zerbe.

81 Firmato da Emmi Keskisarja, Pekka Tynkkynen, Kristof Crolla (LEAD) and Sebastien Delagrange (LEAD).

82 Si pensi ad esempio alle aziende giapponesi tipo Sekisui che propongono a catalogo modelli di abitazioni differenti, in funzione a dei parametri (la casa per famiglia, la casa per l'appassionato di giardinaggio, la casa per chi lavora telematicamente, ecc.).

83 Dall'opuscolo di Bauhaus Dessau (1927) di Walter Gropius. Per approfondire si veda paragrafo 2.1 L'industrializzazione e la prefabbricazione.

84 Antoine Picon durante la conferenza FABRICATE 2017, tiene una lettura dal titolo "Disruption from nostalgia", in cui descrive la capacità dell'uomo di guardare al futuro a partire dal passato, attraverso la fabbricazione digitale.

85 La lavorazione materiale comporta la lavorazione in senso fisico, quindi aggiunta o asportazione di materia, e anche il montaggio della parti.

86 La Fornace Orsoni di Venezia produce mosaici in vetro per rivestimento di pareti, ad uso interno (Sagrada Familia, Barcellona) ed esterno (Arcosolio coniugi Brion, Tomba Brion, TV) e sono realizzati interamente a mano, dalla soffiatura del vetro alla rottura in tessere per mosaici.

87 I modelli costruttivi prefabbricati in cemento armato progettati da Pierluigi Nervi erano realizzati attraverso la produzione e montaggio di un sistema di casseratura e armatura molto complesso, poiché ricostruiva il disegno geometrico del progetto e quindi le nervature delle tensioni, in cui si concentravano i ferri, e le zone non sottoposte a sforzo, che invece venivano "svuotate" quindi non armate.

88 Si pensi che ogni doga è passata da 4 tasselli per lato, quindi sono state realizzate indicativamente 2800 forature, con direzioni e posizioni differenti.

89 È sufficiente la lettura di questi due valori, poiché gli elementi utilizzati sono di dimensione standard: le doghe e i tasselli.

90 Prometeo, secondo la mitologia greca, è colui che ha donato all'uomo il fuoco, che rappresenta ideologicamente il dono della tecnica, per renderlo autonomo e indipendente dalle divinità.

capitolo quattro

La trasformazione della carpenteria lignea: il caso del Nordest

capitolo quattro

La trasformazione della carpenteria lignea

In Italia la produzione di componenti in legno per l'edilizia è caratterizzata da imprese di medie, piccole e micro dimensioni; in altri paesi europei è più frequente la presenza di grandi industrie. Il Nordest rappresenta una delle tre aree, insieme a Lombardia ed Emilia Romagna, con il maggior fatturato in Italia nel settore della carpenteria lignea e solo in quest'area si concentrano circa il 25% delle carpenterie italiane. La rete delle imprese è molto eterogenea, caratteristica dovuta soprattutto alla tipologia di lavorazioni offerte, al numero di addetti e alla data di fondazione. Tali motivi rendono complessa l'indagine del settore manifatturiero di questo specifico ambito, indagine che tuttavia si rende necessaria per capire come la produzione si stia trasformando in relazione all'impiego degli strumenti dell'automazione. Comprendere le dinamiche di tale trasformazione consente di delineare le prospettive di sviluppo per molti operatori sul mercato e consente di descrivere gli elementi di innovazione che caratterizzano la progettazione e la produzione di elementi strutturali in legno.

Il quarto capitolo indaga la manifattura della carpenteria lignea nell'area del Nordest attraverso ricerche condotte sul campo e l'elaborazione di un questionario rivolto alle aziende del settore. Obiettivo di tale indagine non è solamente individuare i casi di eccellenza, ma è conoscere le ragioni che inducono o meno un'azienda a investire nel settore dell'automazione, in relazione alla progettazione e produzione di elementi strutturali in legno. L'indagine evidenzia criticità e potenzialità sulla base delle quali vengono delineate prospettive per lo sviluppo di un modello nuovo di carpenteria lignea. Tale modello viene definito in funzione della fondamentale acquisizione di nuove competenze in ambito non solo strumentale, ma soprattutto culturale. Tali competenze sono caratterizzate dal riconoscimento delle pratiche tradizionali e storiche, dall'interesse e dalla predisposizione al dialogo tra esperti e progettisti e dal desiderio di collaborare allo sviluppo di nuove tecnologie per la risoluzione delle future sfide progettuali.

L'innovazione tecnologica e l'automazione sono elementi strutturanti la trasformazione del settore delle costruzioni e Guido Nardi dichiara cruciale il ruolo dell'innovazione tecnologica in architettura, che non consiste solamente in un'evoluzione tecnica, ma è anche la considerazione del suo ruolo sociale ed economico (Nardi, 1994). Partendo da questi presupposti e attraverso la visione di un'automazione sempre più presente e capace di ridefinire il metodo di lavoro (Rovetta, 1990), nei processi della progettazione e produzione architettonica, la tesi ha definito con *headmade* il ruolo e il valore che ha l'idea nello sviluppo di ogni prodotto, e quindi anche di ogni componente architettonico e di ogni architettura. Tutto ciò influenza le imprese che operano nel campo della lavorazione del legno, nell'attività in cui risiede il *know how* che recupera il saper fare della tradizione e grazie alle quali sarà effettivamente possibile parlare di un'innovazione degli elementi strutturali lignei.

Le carpenterie italiane hanno una storia e una tradizione legata al saper fare locale, così come ogni genere di attività produttiva manifatturiera nazionale. Il settore manifatturiero è complesso da indagare a causa della sua varietà ed eterogeneità, e tale considerazione è valida soprattutto leggendo il contesto italiano, caratterizzato da una struttura economica basata sul modello di Piccole e Medie Imprese (PMI). Ciò enfatizza la stretta connessione tra i processi di costruzione e progettazione e la capacità dei produttori e degli artigiani di innovare e di rispondere alle richieste dei committenti. Per questa ragione, per sondare gli sviluppi e le innovazioni dell'architettura, è di fondamentale importanza conoscere come la produzione si stia trasformando: riconoscere l'insieme delle competenze e il valore delle relazioni professionali che influenza la fattibilità dei progetti, ridefinisce i limiti della progettazione architettonica e, nel caso della presente ricerca, la morfologia dei componenti lignei impiegati.

Per dialogare con le carpenterie è stata svolta un'indagine tramite un questionario. Questo strumento è stato utilizzato per sondare la complessità del panorama locale delle imprese impegnate in attività di carpenteria lignea e per individuare tracce de legame tra il settore manifatturiero e la progettazione dell'innovazione che è alla base del concetto di *headmade*. Inoltre, guardando al futuro della progettazione e della costruzione, l'ingegno e lo studio dei progettisti, il sapere materiale delle carpenterie e la ricerca avanzata delle tecniche sono difficili da scindere. Per

questo motivo, il dialogo con il settore manifatturiero deve essere considerato uno strumento utile per la valorizzazione della progettazione materiale nel processo dell'architettura e per lo sviluppo del valore *headmade*.

Le carpenterie lavorano in stretta relazione con il progettista, che ha la responsabilità del progetto in tutte le sue accezioni, nella ricerca di una corrispondenza tra il costruito e le esigenze degli utenti di oggi e di domani, in riferimento a uno scenario di innovazione dei requisiti di sostenibilità, di prestazioni e di sviluppo formale. Le carpenterie collaborano nel ricercare una corrispondenza tra gli impegni del progetto e gli sviluppi del costruito, costituiscono il luogo in cui, potenzialmente, avviene l'integrazione del saper fare tradizionale con i nuovi strumenti digitali (l'impiego di robot o macchine automatizzate), esse contribuiscono ad ampliare la gamma di possibilità per lo sviluppo della progettazione architettonica e, allo stesso tempo, definiscono in modo nuovo il processo di lavoro manuale e d'ingegno che resta di competenza dell'uomo.

La ricerca tramite questionario, che è stata condotta per fotografare il comparto della manifattura lignea, ha obiettivi diversi ed è stata svolta in maniera differente rispetto a quanto fatto per i centri di ricerca e per i casi studio. L'indagine nel settore produttivo è stata strutturata al fine di descrivere lo stato dell'arte delle aziende italiane, e in particolare del Nordest[1], territorio costituito da 13 province (Belluno, Bolzano, Gorizia, Padova, Pordenone, Rovigo, Trento, Treviso, Trieste, Venezia, Vicenza, Verona, Udine); negli altri casi l'obiettivo è invece stato quello di descrivere le eccellenze, i pionieri della ricerca e i manufatti edilizi che hanno integrato al meglio le tecnologie del legno con il progetto architettonico. L'analisi dedicata alle imprese impegnate nella trasformazione del legno per usi edili non è stata svolta al fine di mappare le eccellenze, ma per conoscere come viene intesa e praticata l'innovazione nelle aziende del settore del legno. Sono state poste domande in merito all'impiego o alla mancanza di strumenti tecnologici ed è stata sondata la considerazione che le aziende ripongono nella digitalizzazione e nell'automazione. Si ritiene che questi fattori siano determinanti per lo sviluppo dell'*headmade* e quindi per la capacità di rispondere puntualmente alle differenti esigenze che contraddistinguono ciascun progetto architettonico. Inoltre, sondare la disponibilità delle aziende ad aprirsi all'innovazione, valutare il loro interesse in possibili futuri investimenti in macchinari e in sviluppo di competenze, consente di ragionare nel merito ai possibili futuri sbocchi sul mercato per il comparto del legno nel Nordest e consente di immaginare la disponibilità di questi interlocutori nel momento in cui dovessero essere chiamati a collaborare a ricerche e a sperimentazioni per lo sviluppo di nuovi studi e nuovi macchinari. Infine, considerata l'ineluttabile progressiva digitalizzazione della progettazione, la ricerca lascia immaginare prospettive di ampliamento o di riduzione del bacino di mercato al quale ogni manifattura può fare riferimento nel momento in cui decide di accostarsi o meno alle tecnologie di recente sviluppo.

4.1 L'evoluzione normativa per l'impiego del legno

Nel contesto italiano, il legno per le costruzioni viene impiegato sia in ambito residenziale che non[2] e le sue fortune sono legate strettamente a due principali fattori: la standardizzazione della produzione industrializzata e l'evoluzione delle normative per le costruzioni. Tali fattori, a loro volta, sono interrelati l'uno all'altro e così strettamente legati allo sviluppo delle manifatture, da rendere evi-

NTC 2018 - LE COSTRUZIONI IN LEGNO

Il 22 marzo 2018 sono entrate in vigore le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, che nel caso delle costruzioni in legno risulta più aggiornata rispetto le precedenti NTC 2008.
Non sono state introdotte modifiche sostanziali, ma si tratta più che altro di aggiornamenti, sempre più in linea con quanto espresso dall'Eurocodice 5.
Gli aggiornamenti riguardano soprattutto i paragrafi 4.4 (sicurezza), 7.7 (sisma) e 11.7(certificazione materiali).
In primis l'obbligo di utilizzare solo materiali certificato per la carpenteria lignea, sia in legno sia a base di legno: questa obbligatorietà è la condizione per utilizzare un prodotto a tavole incrociate, introdotto appunto con le NTC 2018. Conseguentemente sono stati rivisti i coefficienti di sicurezza (paragrafo 4.4), in cui sono stati inseriti anche altri valori accanto a quelli già in uso e che sono più vicini rispetto a quanto dichiarato dall'Eurocodie 5.
Per quanto riguarda il comportamento sismico delle strutture in legno (paragrafo 7.7), analogamente agli altri materiali da costruzione, sono stati ridefiniti i valori del comportamento al sisma per le differenti tipologie strutturali e aumentare il livello di sicurezza.
Un ulteriore importante aggiornamento riguarda la natura del prodotto, in relazione alle norme di prodotto generali che sono state oggetto di revisione presso l'Unione Europea a partire dal 2008. L'aggiornamento non riguarda esclusivamente le certificazioni, ma anche le procedure richieste per l'identificazione e l'accettazione del materiale, obbligatoria anche in cantiere prima della messa in opera.

dente l'esigenza di supportare l'innovazione attraverso finanziamenti, progetti coraggiosi e, soprattutto, un adeguato supporto normativo (tale da non ostacolare l'iniziativa industriale e quella progettuale).

L'evoluzione del quadro normativo è stata determinante per l'impiego e la diffusione delle costruzioni in legno, così come lo era stato per le costruzioni in acciaio[3]. Sebbene il legno sia un materiale che in Italia è storicamente e diffusamente utilizzato per le coperture e i solai (e localmente impiegato per la realizzazione di interi edifici), durante gli anni dell'industrializzazione edilizia il suo utilizzo fu quasi totalmente abbandonato. Gli anni della ricostruzione postbellica (e quelli ad essi subito successivi) furono definiti dalla necessità di costruire rapidamente, impiegando manodopera poco specializzata e utilizzando materiali omogeneamente diffusi su tutto il territorio nazionale, che non necessitassero delle competenze e dei tempi (di maturazione e di lavorazione) che determinano la qualità dei prodotti strutturali lignei. Si diffuse l'impiego di elementi prefabbricati in calcestruzzo e vennero sviluppati i sistemi costruttivi in laterocemento che, per la loro facilità d'uso e il costo relativamente basso, dominano ancora oggi buona parte del mercato dei prodotti e degli elementi per l'edilizia.

Fino al Novecento, l'impiego del legno per le costruzioni venne regolamentato con decreti che consideravano l'impiego del legno soprattutto al fine della messa in opera del "sistema baraccato", un sistema costruttivo a telaio adatto a rispondere agli eventi sismici[4]. Sebbene il legno sia descritto nelle normative antisismiche[5], "nelle università l'insegnamento della tecnica delle costruzioni in cemento armato prende il sopravvento su quella del legno. Il legno resterà presente nelle normative antisismiche, ma non vi saranno più i presupposti culturali e tecnici per un suo diffuso impiego" (Giachino, 2013, p. 15). Successivamente, le norme costruttive degli anni Sessanta e Settanta descrivono le costruzioni in legno come strutture eccezionali[6], normate in riferimento agli standard DIN[7] e per le quali era necessario richiedere il nulla osta dell'Ufficio del Genio Civile, con tempi di risposta che potevano arrivare anche a 12 mesi. Sono le Norme Tecniche Costruttive emanante con il D.M. del 14 gennaio 2008, conosciute anche il nome di Testo Unico, a definire le attuali normative, oggi aggiornate con l'emanazione delle NTC 2018, per l'impiego del legno: alla prima pubblicazione seguono differenti aggiornamenti, anche per migliorare progressivamente la corrispondenza delle norme italiane con le indicazioni che erano state pubblicate nel 1995 nell'Eurocodice5[8].

Nel 2011 viene emanato l'art. 45 del DL 201 (Decreto Salva Italia), che sostituisce l'articolo 52 del "Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia" del 2001 (DPR 380) in merito alla necessità di richiedere uno specifico permesso di costruzione, questione che incide molto sulla diffusione dei sistemi costruttivi in legno. Prima del Decreto Salva Italia era necessaria "una dichiarazione rilasciata dal presidente del Consiglio superiore dei lavori pubblici su conforme parere dello stesso Consiglio" al fine di garantire l'idoneità di "sistemi costruttivi diversi da quelli in muratura o con ossatura portante in cemento armato normale e precompresso, acciaio o sistemi combinati dei predetti materiali, per edifici con quattro o più piani entro e fuori terra" (DPR 380 del 2001). Successivamente tale dichiarazione fu necessaria solo per "materiali o sistemi costruttivi diversi da quelli disciplinati dalle norme tecniche in vigore" (DL 201 del 2011). Questa variazione costituì un passo fondamentale per avvicinare le normative italiane alle indicazioni dell'Eurocodice5 e per evitare le contraddizioni dovute alla progressione delle regolamentazioni. Questo conte-

sto normativo ha agevolato l'impiego di elementi prefabbricati per lo sviluppo dell'edilizia in legno, poiché si trattava di prodotti già certificati che, per essere messi in opera, non necessitano dell'Attestato di certificazione firmato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici: questa scelta consente di evitare il lungo iter procedurale (della durata anche di un anno), che risulta obbligatorio per l'impiego di elementi in legno privi di certificazione.

Il 22 marzo 2018 vennero emanate le NTC che portarono ulteriori aggiornamenti in materia di prescrizioni generali, di progettazione in zona sismica e di prescrizioni sulla materia prima; questi aggiornamenti proseguono il lavoro di adeguamento delle norme italiane rispetto agli standard europei. Le NTC aggiornano i coefficienti di sicurezza da impiegare per il predimensionamento delle strutture, permettendo di ottimizzare l'utilizzo del legno. Prima del 2018 le norme italiane chiedevano di sovradimensionare gli elementi per la carpenteria lignea con coefficienti più elevati rispetto a quelli previsti da altri Paesi europei: tale sovradimensionamento si traduceva in un aumento della quantità di materiale necessario alla realizzazione di ogni struttura, con conseguenti ripercussioni sui costi e sul consumo della materia prima (Giachino, 2013, p. 16).

L'evoluzione delle regolamentazioni, i ritardi (e i vuoti) normativi, hanno avuto ripercussioni pesanti sulla progettazione e la costruzione di strutture in legno. Tutto ciò "ha scoraggiato chi avesse voluto intraprendere la strada delle costruzioni in legno" (Giachino, 2013, p. 16) e furono spesso preferiti gli elementi in legno prefabbricati, certificati e provenienti dall'estero[9]. Si registra infatti uno squilibrio tra produzione e consumo di legname da lavoro e da opera, ciò conferma che "in Italia [lo squilibrio] è divenuto tale che nel breve volgere di due decenni le importazioni che coprivano nel 1950 il 42% del consumo apparente sono passate a coprirne il 73% nel 1970" (Fodella, 1979). Questa tendenza ancora oggi è confermata ad esempio dal mercato internazionale del legno lamellare, che insieme ai pannelli X-Lam, costituiscono le tipologie di prodotto più utilizzate nel settore dell'edilizia: secondo UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*) l'Italia nel 2016 è stato il maggior importatore di *glulam* austriaco[10] (292.000 mc, pari al 51% del *glulam* austriaco esportato), seguito da Giappone (80.479 mc) e Germania (74.532 mc).

A partire dagli anni Novanta, le aziende tendono a sviluppare e a proporre prodotti in legno prefabbricati ma sempre più vari in termini di prestazioni e dimensioni: i prodotti vengono integrati con altri materiali, ad esempio per soddisfare i requisiti termo-acustici[11], e la prefabbricazione interessa non più solamente i singoli elementi strutturali ma propone intere pareti e unità più complesse (anche intere abitazioni o parti di esse, "a catalogo"). In Italia l'impiego di pannelli strutturali in legno, pannelli composti da strati di tavole incrociate e tra loro incollate[12], è continuato a crescere costantemente e nel 2015 rappresentava il 45% delle costruzioni in legno. La pubblicazione delle NTC 2008 e l'introduzione nel mercato di elementi prefabbricati in legno, supportati anche dalla crescente considerazione del valore di sostenibilità facilmente associato all'impiego del legno[13], contribuiscono a spostare i confini geografici e ad impiegare il legno al di fuori dei contesti geografici in cui questo definisce una parte del patrimonio culturale locale. Le abitazioni cosiddette "prefabbricate" (ma che sarebbe più corretto definire "pre-progettate") in legno divengono una soluzione rapida per la realizzazione di abitazioni unifamiliari e non solo. Tra i fattori che hanno contribuito a far conoscere le potenzialità del legno in edilizia vi sono, inoltre, la ricostruzione a valle del terremoto dell'Aquila nel 2009 e l'Expo di Milano nel 2015 (fig. 01),



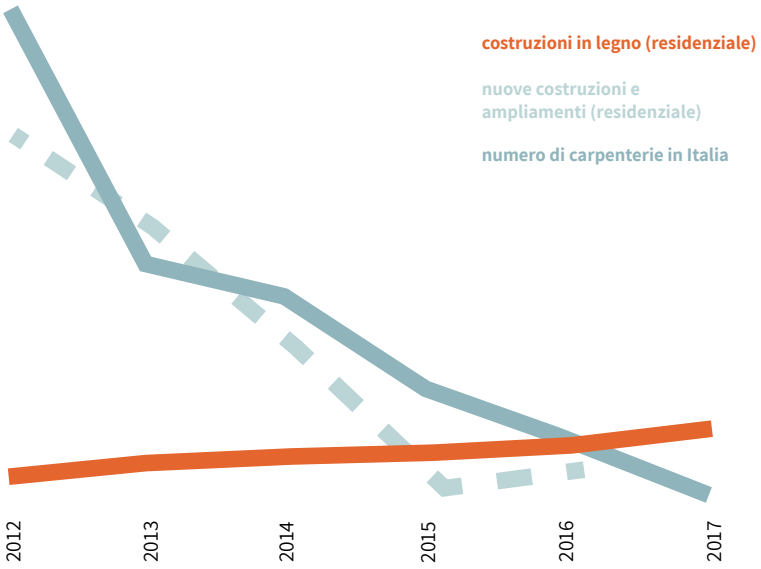
01. EXPO Milano 2015, uno dei tre padiglioni Slow Food progettati da Herzog & De Meuron: la struttura è stata realizzata con legno lamellare in larice. Anche in altri padiglioni per la rappresentanza di nazioni (24) e cluster tematici (31), è stato impiegato il legno, sia come elemento strutturale che come materiale per il rivestimento, come nei casi di Giappone, Cile o Cina per citarne solo alcuni. Durante la fiera XYLexpo 2018 (tecnologie per la lavorazione del legno), molti dei rappresentanti intervistati hanno dichiarato che in occasione dell'expo sono state prodotte e realizzate macchine ad hoc per le carpenterie e le falegnamerie impegnate nella lavorazione dei componenti per i padiglioni. Slow Food

che hanno portato il legno all'attenzione dei media e che lo descrivono come una soluzione per realizzare edifici in modo rapido, flessibile e innovativo.

L'aggiornamento normativo per la tutela e l'impiego del legno in Italia, è stato possibile anche grazie anche alla movimentazione degli enti di riferimento per il settore[14], di livello nazionale come CNR IVALSA[15], Federlegnoarredo[16], Assolegno[17], o di livello territoriale legati a specifiche aree geografiche come ad esempio l'associazione bolzanina Promolegno[18] e i Consorzi per la tutela del legno dei vari distretti produttivi[19]. Tra gli obiettivi di queste istituzioni vi è quello di monitorare l'industria del legno (non solo di quello impiegato per la realizzazione di edifici e strutture portanti) e di sviluppare occasioni e indicazioni per agevolare l'affermazione sul mercato nazionale ed internazionale la manifattura italiana. Nel 2017 FederlegnoArredo, per conto di Assolegno, ha divulgato il "2° Rapporto Case ed edifici in legno" (2017) in cui descrive il 2015 come un anno in cui il numero delle costruzioni in legno ad uso residenziale ha registrato un lieve aumento: rispetto al totale dei permessi da costruire che riguardano abitazioni (sia di nuova costruzione che ampliamenti), le strutture

in legno hanno registrato una crescita dello 0,8% rispetto all'anno precedente[20]. Questo dato acquisisce valore se messo in relazione con la tendenza generale dei permessi di costruire che registrano invece una diminuzione: dal 2005 al 2015 il numero dei permessi è ha subito un calo cumulato pari al 85%, contando 237.000 permessi in meno; nel 2015 i permessi si sono assestati al 40.932[21]. La crescita delle costruzioni in legno, se considerata in un contesto più ampio, denota il recupero della fiducia nei confronti di un materiale che negli ultimi decenni era stato quasi dimenticato (fig. 02).

In Italia nel 2015 sono state realizzate circa 1200 nuove abitazioni, di cui il 60% con sistemi costruttivi in legno: di queste il 20% è stato costruito in Lombardia, il 18% in Veneto e il 13% in Trentino Alto Adige (Federlegno, 2017, p. 11). L'area del Nordest d'Italia è caratterizzata da un'alta presenza di boschi di conifere (INFC, 2005), più precisamente di larice, abete bianco e abete rosso, che sono le specie più utilizzate per la carpenteria lignea (fig. 03). Questa geografia ha favorito, nel corso della storia, l'impiego del legno da parte delle popolazioni locali: si pensi ad esempio al ruolo di questo materiale nella storia della Serenissima di Venezia, materia prima per la realizzazione delle proprie flotte navali e per lo sviluppo del tessuto edilizio (dai pali di fondazione ai solai). "I Veneziani importavano dai boschi delle Prealpi e del Cadore, la quercia e il rovere (fino al loro esaurimento), l'abete, il pino, il larice, il faggio e il carpino; dal Tirolo s'importava il pino il larice e l'abete rosso, dal Friuli abeti e larici" (Barbisan, 2008, p. 44). Le leggi veneziane sulla selvicoltura costituiscono un *unicum* a livello europeo: riguardavano la gestione dei boschi, il taglio e il trasporto del legname, e le disposizioni per l'impiego della materia prima. A partire dal 1500 nell'area del Nordest cresce il numero di segherie a funzionamento idraulico, la così detta "segheria alla veneziana"[22], in cui le macchine erano mosse dalla forza dell'acqua dei torrenti attraverso l'impiego di mulini[23]. La crescita si mantiene tale fino all'introduzione delle macchine a vapore e successivamente dell'energia che nell'arco di un secolo sposta la produzione anche in altre zone geografiche, lontane anche dai torrenti ad esempio. Il mercato del legno nell'area del Nordest ha quindi rappresentato un importante risorsa per il territorio, soprattutto nel passato, e la silvicoltura è stata gestita con regolamenti che hanno contribuito a salvaguardare nel corso degli anni parte dei boschi.



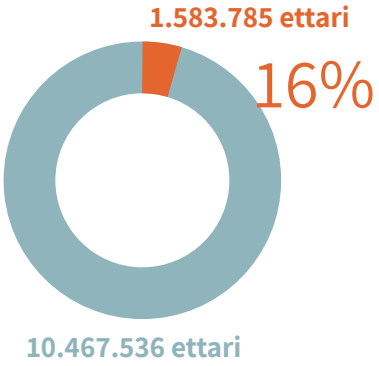
02. Rapporto tra permessi da costruire per nuove abitazioni e ampliamenti, e le costruzioni in legno. Nonostante il settore edilizio abbia registrato un importante calo e sia solo negli ultimi anni in ripresa, il settore delle costruzioni in legno negli ultimi anni registra una lieve e costante crescita. In senso opposto invece il numero delle carpenterie presenti sul territorio italiano, in continuo calo (fonte FederlegnoArredo 2018).

Le superfici boschive in Italia e nel Nordest

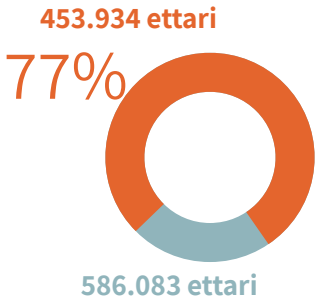
Area del Nordest
Friuli Venezia Giulia, Veneto, Trentino, Alto Adige

Italia

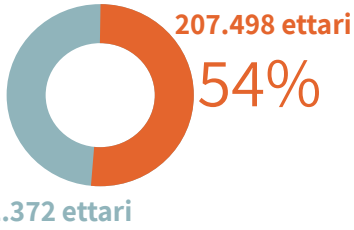
Superficie boschiva totale



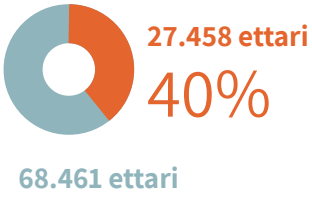
Superficie boschiva di abete rosso



Superficie boschiva di larice



Superficie boschiva di abete bianco



03. Le superfici dei boschi in Italia suddivise per regione: nella prima tabella sono riportati i valori complessivi, nella seconda invece viene fatto riferimento alle superfici dei boschi di larice, abete rosso e abete bianco, cioè le specie di legno più utilizzate in edilizia per la realizzazione di elementi strutturali in legno o base di legno. I grafici raffigurano i valori complessivi del Nordest, comprensivo di Friuli Venezia Giulia, Veneto, Trentino, Alto Adige (fonte dati INFC 2005).

SUPERFICIE BOSCHIVA NELLE REGIONI ITALIANE (valore espresso in ettari)

Regione	Superficie boschiva	Altre terre boscate	Superficie Boschiva Totale	Superficie boschiva totale su territorio regionale
Sardegna	583.472	629.778	1.213.250	50%
Toscana	1.015.728	135.811	1.151.539	50%
Piemonte	870.594	69.522	940.116	37%
Lombardia	606.045	59.657	665.703	28%
Calabria	468.151	144.781	612.931	41%
Emilia Romagna	563.263	45.555	608.818	28%
Lazio	543.884	61.974	605.859	35%
Veneto	397.889	48.967	446.856	24%
Campania	384.395	60.879	445.274	33%
Abruzzo	391.492	47.099	438.590	41%
Trentino	375.402	32.129	407.531	66%
Umbria	371.574	18.681	390.255	46%
Liguria	339.107	36.027	375.134	69%
Alto Adige	336.689	35.485	372.174	50%
Friuli V.G.	323.832	33.392	357.224	45%
Basilicata	263.098	93.329	356.426	36%
Sicilia	256.303	81.868	338.171	13%
Marche	291.394	16.682	308.076	32%
Puglia	145.889	33.151	179.040	9%
Molise	132.562	16.079	148.641	33%
Valle d'Aosta	98.439	7.489	105.928	32%
Italia	8.759.202	1.708.335	10.467.536	35%

SUPERFICIE BOSCHIVA DI SPECIE LEGNOSE NELLE REGIONI ITALIANE (valore espresso in ettari)

Regione	Boschi di larice e cembro	Boschi di abete rosso	Boschi di abete bianco
Piemonte	81.569	18.585	14.141
Valle d'Aosta	44.528	18.230	1.156
Lombardia	47.678	88.374	8.005
Alto Adige	91.693	175.065	2.647
Trentino	63.038	137.203	15.856
Veneto	40.876	96.703	7.097
Friuli V.G.	11.891	44.963	1.858
Liguria	1.099	366	2.931
Emilia Romagna	0	4.046	2.942
Toscana	0	1.445	4.336
Umbria	0	0	0
Marche	0	372	0
Lazio	0	369	0
Abruzzo	0	362	724
Molise	0	0	1.171
Campania	0	0	0
Puglia	0	0	0
Basilicata	0	0	746
Calabria	0	0	4.851
Sicilia	0	0	0
Sardegna	0	0	0
Italia	382.372	586.083	68.461

Le aziende del settore sono cresciute, si sono trasformate e hanno cessato di lavorare anche in relazione delle zone geografiche di afferenza: nelle Province Autonome di Trento e Bolzano la filiera delle costruzioni in legno è restata attiva[24] e ad oggi esse costituiscono l'area in cui si registra il più alto fatturato per la produzione di edifici in legno, pari al 46% sul valore nazionale (Federlegno-Arredo, 2017, p. 10). Nella zona del Cadore le segherie sono gradualmente diminuite a partire dall'Ottocento poiché la produzione del legname si era ridotta e i centri di taglio erano stati trasferiti in pianura; a partire dal 1961[25] il Cadore diviene un importante distretto dell'occhialeria. Nonostante le trasformazioni che hanno coinvolto le diverse zone in cui è possibile distinguere la manifattura del legno con sede nel Nordest, è riconoscibile un tessuto di piccole-medie imprese (PMI) e micro imprese[26]: in Italia le PMI sul piano dell'occupazione coinvolgono il 78,8% degli addetti, superiore alla media europea (69,4%). In questo contesto il Veneto rappresenta la terza regione in Italia con il più alto numero di imprese di queste categorie, pari al 17% (Confartigianato, 2017, p. 22).

Accanto alla complessità numerica di imprese nel tessuto economico, anche la stessa tipologia di attività si è trasformata e specializzata in alcuni ambiti del processo: la lavorazione della materia prima è concentrata in un ridotto numero di aziende, mentre le imprese in grado di eseguire le operazioni di montaggio sono numerose e distribuite sul territorio (Zamboni, 2018). Non è possibile stabilire se le competenze delle aziende di più recente formazione, dedicate soprattutto ad attività di montaggio, siano rivolte esclusivamente a sistemi costruttivi specifici oppure se queste competenze siano simili a quelle di una carpenteria tradizionale e tali da consentire di intervenire su differenti tipologie costruttive in relazione alle esigenze di specifici progetti architettonici.

4.2 Impiego e prospettive dell'automazione: un questionario

Questo insieme di riflessioni evidenzia la mancanza di quadro descrittivo dello stato dell'arte in merito alle competenze e al *know how* delle imprese che realizzano elementi strutturali lignei. Risolvere tale mancanza è una questione di competenza degli enti, degli istituti e del legislatore ma, al fine di relazionare la presente tesi di dottorato ad un contesto e di individuare, in tale contesto, possibili interlocutori disposti al confronto sui temi dell'innovazione, è stata sviluppata un'indagine tramite questionario rivolta alle carpenterie attive sul territorio del Nordest. L'indagine ha l'obiettivo di comprendere l'atteggiamento delle aziende della carpenteria lignea al confronto con le innovazioni come descritte dalla presente ricerca[27] e identificate con l'adeguato impiego della strumentazione digitale oggi disponibile (fig. 04). La lavorazione del legno è caratterizzata da tradizioni radicate sul territorio che, potenzialmente, possono trovare motivi di scontro o di attrito con la tecnologia avanzata. Allo stesso tempo, la carpenteria lignea è un settore in espansione soprattutto in relazione al comparto edilizio nel quale si registra una lieve ma costante crescita di costruzioni in legno (FederlegnoArredo 2017). Infine, il legno impiegato in architettura è potenzialmente caratterizzato da un alto grado di progettualità e da una gamma di lavorazioni ampliata dai nuovi prodotti a base legno e dalle nuove strumentazioni digitali: la sua lavorazione comporta un'elevata competenza tecnica.

Date queste premesse, la ricerca definisce la manifattura che è capace di rispondere puntualmente al progetto, come una forma di produzione utile allo sviluppo del valore *headmade*: questa caratteristica rende la carpenteria lignea un ambito



04. Macchina CNC in una falegnameria della provincia di Venezia, acquistata alla fine degli anni Novanta: la macchina è molto utilizzata per la realizzazione di elementi di arredo, serramenti e porte. I comandi alla macchina CNC vengono indicati attraverso l'unità di comando tramite la lettura di floppy disk.

di grande interesse per lo sviluppo di un linguaggio progettuale, coerente con la concezione strutturale delle parti architettoniche e fondato sui principi della qualità e dell'efficienza e meno vincolato alle esigenze della produzione in serie.

Queste le ragioni per cui la filiera del legno, e in particolare la produzione di elementi strutturali lignei, rappresenta uno dei più interessanti campi di indagine per osservare la trasformazione degli strumenti e del rapporto tra la produzione e il materiale e il progetto.

Per fotografare lo stato di fatto in merito all'innovazione figlia dell'automazione, è stato predisposto un questionario caratterizzato da una struttura tale da consentirne la replicazione al variare di una o più delle caratteristiche dei soggetti intervistati che, a tutti gli effetti, definiscono gli attuali limiti dell'indagine. Tali limiti sono di tipo:

- merceologico: per fotografare lo stato dell'arte nel merito alla produzione di elementi strutturali in legno focalizzando la ricerca sulle carpenterie e non sulle falegnamerie;
- strumentale: per misurare la diffusione di robot e/o macchine CNC e per capire se la frequenza d'utilizzo di questi strumenti automatizzati può definire il grado di innovazione di un'azienda;
- geografico: per confrontare i temi della ricerca con le politiche aziendali delle carpenterie italiane che, dal punto di vista territoriale, sono in più diretta competizione con le eccellenze d'oltralpe;
- economico: per relazionare dati e riflessioni alla dimensione delle carpenterie intervistare, in quanto il fatturato e il numero di addetti possono incidere sulla possibilità di investimento in ricerca e sviluppo, e quindi di aggiornamento tecnologico, di un'azienda.

Il **limite merceologico** è stato definito a partire dalla classificazione ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) delle attività economiche che sviluppa con una serie di codici stila il Registro delle Imprese[28] organizzando categorie in funzione delle tipologie di attività e ordinando l'elenco con codici ATECO (ATttività ECOnomica) in cui la combinazione alfanumerica indica:

- con le lettere il macro-settore economico che, all'interno della classificazione, viene denominato "sezione";

- con i numeri (da due a sei cifre) il grado di specializzazione e le sottocategorie di ciascun comparto; in ordine crescente di numero di cifre, il grado è denominato "divisione" (due cifre), "gruppo" (tre cifre), "classe" (quattro cifre), "categoria" (cinque cifre), "sottocategoria" (sei cifre).

Il codice ATECO consente quindi di individuare l'andamento di ciascun settore merceologico, in relazione alla dimensione, al fatturato, allo stato giuridico delle aziende che lo costituiscono (fig. 05). I macro settori economici sono individuati nella "Sezioni dei macro settori economici ATECO", e l'attività della carpenteria lignea è stata individuata all'interno della sezione C (Attività manifatturiera) in quanto obiettivo della ricerca è indagare la produzione e quindi la trasformazione materiale. La sezione F (Costruzioni) non è stata considerata in quanto raccoglie le imprese edili impegnate nelle attività di progettazione e di montaggio.

All'interno della sezione C (Attività manifatturiera) è stata analizzata la divisione numero 16, l'elenco completo delle divisioni è riportato in "Divisioni della sezione C - Attività manifatturiera ATECO".

La divisione 16 raccoglie le imprese identificate come "Industria del legno e dei prodotti in legno e sughero (esclusi i mobili); fabbricazione di articoli in paglia e materiali da intreccio".

I gruppi contenuti in questa divisione sono:

- 16.1 "Taglio e piallatura del legno"[29], che coincide con l'omonima classe 16.10 e non contiene altre categorie e sottocategorie;
- 16.2 "Fabbricazione di prodotti in legno, sughero, paglia e materiali da intreccio"; all'interno di questa classe è stata individuata la sottocategoria 16.23.2 "Fabbricazione di altri prodotti di carpenteria in legno e falegnameria per l'edilizia"[30].

I codici selezionati per l'individuazione delle aziende sono pertanto due:

- 16.1 "Taglio e piallatura del legno";
- 16.23.2 "Fabbricazione di altri prodotti di carpenteria in legno e falegnameria per l'edilizia".

Il **limite strumentale** è stato definito verificando la presenza o l'assenza di strumenti i tipo robot e/o macchine a controllo numerico[31] presso le aziende. Questo limite semplifica il quadro complessivo delle aziende elencate attraverso i codici ATECO ma apre a una valutazione complessa e difficile da parametrizzare: la presenza di macchine o strumenti avanzati non corrisponde necessariamente ad un elevato grado di innovazione aziendale. Per tale motivo, si evidenziano due temi che sono stati, a loro volta, oggetto di indagine:

- le modalità attraverso le quali le imprese impiegano robot e/o macchine a controllo numerico. A partire dalla considerazione che un'azienda non è fautrice di innovazioni solo in virtù della presenza di una determinata tecnologia, il questionario raccoglie informazioni al fine di comprendere se gli strumenti dell'automazione sono utilizzati nel pieno delle loro potenzialità. Tale caratteristica è difficile da misurare e, nonostante l'acquisto di macchinari avanzati costituisca un oneroso impegno dal punto di vista economico e di formazione per le imprese, il loro impiego risulta spesso parziale o riduttivo. Quando ciò accade, il questionario fotografa la difficoltà di aggiornamento e di formazione del personale presente in azienda e lascia lo spazio agli intervistati per commentare liberamente la situazione.
- la percezione di una mancanza, da parte delle imprese intervistate, di

05. La classificazioni merceologica di ATECO è leggibile attraverso una combinazione alfanumerica in cui ciascun valore indica un preciso settore, passando dai macro settori economici a settori più specializzati. In ordine sono definiti: sezione, divisione, gruppo, classe, categoria, sottocategoria. Le tabelle riportano la sezione e la divisione del settore della carpenteria lignea e della falegnameria.

SEZIONI DEI MACRO SETTORI ECONOMICI ATECO	
A	AGRICOLTURA, SILVICOLTURA E PESCA
B	ESTRAZIONE DI MINERALI DA CAVE E MINIERE
C	ATTIVITÀ MANIFATTURIERE
D	FORNITURA DI ENERGIA ELETTRICA, GAS, VAPORE E ARIA CONDIZIONATA
E	FORNITURA DI ACQUA; RETI FOGNARIE, ATTIVITÀ DI GESTIONE DEI RIFIUTI E RISANAMENTO
F	COSTRUZIONI
G	COMMERCIO ALL'INGROSSO E AL DETTAGLIO; RIPARAZIONE DI AUTOVEICOLI E MOTOCICLI
H	TRASPORTO E MAGAZZINAGGIO
I	ATTIVITÀ DEI SERVIZI DI ALLOGGIO E DI RISTORAZIONE
J	SERVIZI DI INFORMAZIONE E COMUNICAZIONE
K	ATTIVITÀ FINANZIARIE E ASSICURATIVE
L	ATTIVITA' IMMOBILIARI
M	ATTIVITÀ PROFESSIONALI, SCIENTIFICHE E TECNICHE
N	NOLEGGIO, AGENZIE DI VIAGGIO, SERVIZI DI SUPPORTO ALLE IMPRESE
O	AMMINISTRAZIONE PUBBLICA E DIFESA; ASSICURAZIONE SOCIALE OBBLIGATORIA
P	ISTRUZIONE
Q	SANITA' E ASSISTENZA SOCIALE
R	ATTIVITÀ ARTISTICHE, SPORTIVE, DI INTRATTENIMENTO E DIVERTIMENTO
S	ALTRE ATTIVITÀ DI SERVIZI
T	ATTIVITÀ DI FAMIGLIE E CONVIVENZE COME DATORI DI LAVORO PER PERSONALE DOMESTICO; PRODUZIONE DI BENI E SERVIZI INDIFFERENZIATI PER USO PROPRIO DA PARTE DI FAMIGLIE E CONVIVENZE
U	ORGANIZZAZIONI ED ORGANISMI EXTRATERRITORIALI

DIVISIONI DELLA SEZIONE C "ATTIVITÀ MANIFATTURIERE" ATECO	
10	INDUSTRIE ALIMENTARI
11	INDUSTRIA DELLE BEVANDE
12	INDUSTRIA DEL TABACCO
13	INDUSTRIE TESSILI
14	CONFEZIONE DI ARTICOLI DI ABBIGLIAMENTO; CONFEZIONE DI ARTICOLI IN PELLE E PELLICCIA
15	FABBRICAZIONE DI ARTICOLI IN PELLE E SIMILI
16	INDUSTRIA DEL LEGNO E DEI PRODOTTI IN LEGNO E SUGHERO (ESCLUSI I MOBILI); FABBRICAZIONE DI ARTICOLI IN PAGLIA E MATERIALI DA INTRECCIO
17	FABBRICAZIONE DI CARTA E DI PRODOTTI DI CARTA
18	STAMPA E RIPRODUZIONE DI SUPPORTI REGISTRATI
19	FABBRICAZIONE DI COKE E PRODOTTI DERIVANTI DALLA RAFFINAZIONE DEL PETROLIO
20	FABBRICAZIONE DI PRODOTTI CHIMICI
21	FABBRICAZIONE DI PRODOTTI FARMACEUTICI DI BASE E DI PREPARATI FARMACEUTICI
22	FABBRICAZIONE DI ARTICOLI IN GOMMA E MATERIE PLASTICHE
23	FABBRICAZIONE DI ALTRI PRODOTTI DELLA LAVORAZIONE DI MINERALI NON METALLIFERI
24	METALLURGIA
25	FABBRICAZIONE DI PRODOTTI IN METALLO (ESCLUSI MACCHINARI E ATTREZZATURE)
26	FABBRICAZIONE DI COMPUTER E PRODOTTI DI ELETTRONICA E OTTICA; APPARECCHI ELETTROMEDICALI, APPARECCHI DI MISURAZIONE E DI OROLOGI
27	FABBRICAZIONE DI APPARECCHIATURE ELETTRICHE ED APPARECCHIATURE PER USO DOMESTICO NON ELETTRICHE
28	FABBRICAZIONE DI MACCHINARI ED APPARECCHIATURE NCA
29	FABBRICAZIONE DI AUTOVEICOLI, RIMORCHI E SEMIRIMORCHI
30	FABBRICAZIONE DI ALTRI MEZZI DI TRASPORTO
31	FABBRICAZIONE DI MOBILI
32	ALTRE INDUSTRIE MANIFATTURIERE
33	RIPARAZIONE, MANUTENZIONE ED INSTALLAZIONE DI MACCHINE ED APPARECCHIATURE

macchinari di ultima generazione. Gli strumenti dell'automazione rappresentano una possibilità di sviluppo per le aziende e, a seconda delle lavorazioni, essi si possono rivelare indispensabili o non necessari. La mancanza di macchinari non va intesa a priori come una lacuna: è doveroso distinguere le aziende che non necessitano di questa tipologia di strumenti, da quelle che sono potenzialmente interessate alla loro adozione. In quest'ultimo caso, vi sono due principali ostacoli all'acquisizione degli strumenti dell'innovazione. Il primo ostacolo è di natura economica e si esplicita nella mancanza di liquidità da investire nella strumentazione e nella formazione nel personale; il secondo ostacolo è di natura culturale e viene riconosciuto qualora sia evidente l'indisposizione al dialogo o la mancanza di fiducia nei confronti delle nuove tecnologie.

Il **limite geografico** orienta l'indagine all'analisi all'osservazione delle imprese in funzione della geografia dei luoghi e alla distribuzione dei comparti produttivi: tale scelta non è stata effettuata allo scopo di fornire un'analisi rappresentativa dell'intera compagine delle carpenterie d'Italia, ma ha lo scopo di facilitare lo sviluppo delle future ricerche con l'auspicio che il presente modello di indagine possa essere replicato anche per un differente territorio, come ad esempio il comparto brianzolo oppure quello svizzero e austriaco.



06. Distribuzione territoriale delle abitazioni costruite dalle aziende coinvolte nel 2° Rapporto Case Federlegno, che corrispondono circa al 60% del totale di abitazioni in Italia (1931), per un numero pari a 1.150. Le regioni che si distinguono sono la Lombardia (20%), Veneto (18%), Emilia Romagna (15%) e Trentino Alto Adige (13%). A seguire Piemonte (7%), Marche 6%, Toscana (4%), Lazio (3%), Liguria (3%). Il restante 8% è distribuito nelle altre regioni (fonte FederlegnoArredo 2017).

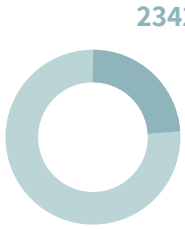
Il **limite economico** individua le aziende che, dal punto di vista territoriale, sono in più diretta competizione con le eccellenze d'oltralpe; tale limite legge le regioni di Friuli Venezia Giulia, Trentino Alto Adige, Veneto, territorio costituito da 13 province (Belluno, Bolzano, Gorizia, Padova, Pordenone, Rovigo, Trento, Treviso, Trieste, Venezia, Vicenza, Verona, Udine). In un quadro di riferimento nazionale, l'area del Nordest risulta interessante in quanto registra:

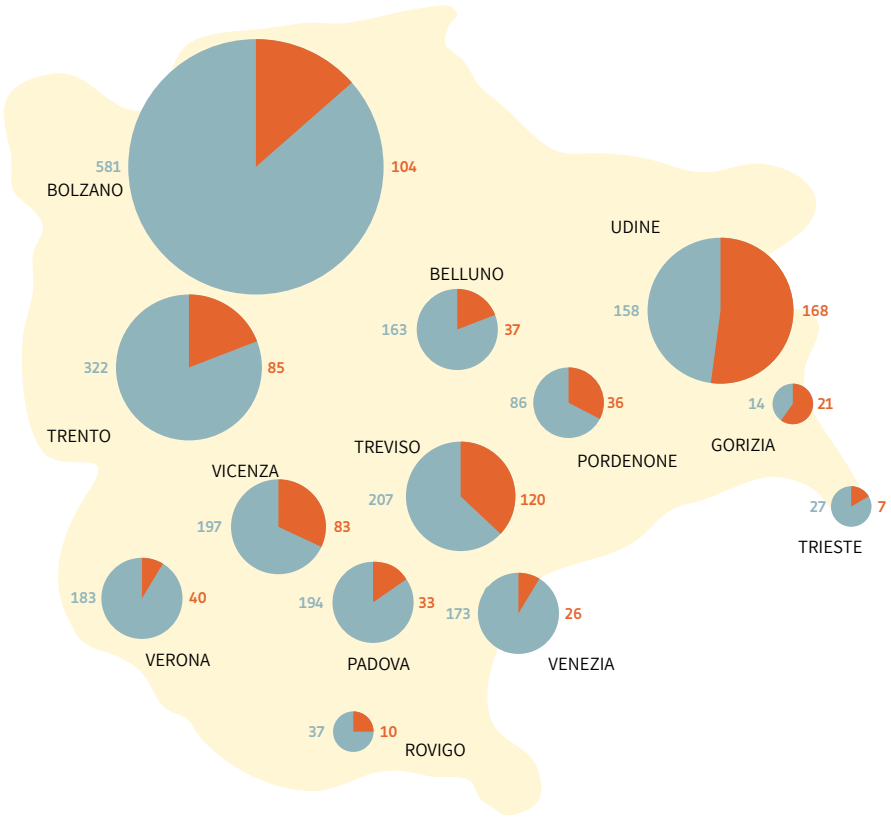
- ripresa delle costruzioni in legno (fig. 06). Il settore delle costruzioni in legno sta registrando una lieve ma costante crescita (soprattutto nel settore residenziale che registra un +0,8%)[32]. Il Veneto e il Trentino Alto Adige rappresentano rispettivamente la seconda e la terza regione a livello nazionale per numero di abitazioni in legno, dopo la Lombardia (Federlegno, 2017);
- presenza di carpenterie e falegnamerie (fig. 07). L'area del Nordest registra il 24,7% delle aziende italiane del settore 16.10 (con un numero di imprese pari a 770) e il 19,4% delle aziende del settore 16.23.2 (con un numero di imprese pari a 2342) (Registro Imprese, Telemaco, 2017). Inoltre, in termini di fatturato, il Trentino Alto Adige copre il 46% del Fatturato nazionale annuo per i settori identificati (FederlegnoArredo 2017);
- disponibilità di materia prima. Il territorio del Trivento è caratterizzato dalla presenza di boschi di larice e abete, le specie più utilizzate per la produzione di carpenteria lignea. I boschi di larice e cembro del Nordest corrispondono al 44% della superficie boschiva nazionale delle stesse specie; tale stima percentuale nel caso dell'abete rosso registra il 77%, e nel caso dell'abete bianco il 40% (INFC Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio, 2005);
- elevata presenza di Piccole e Medie Imprese. In Italia il settore manifatturiero è composto principalmente da piccole-medie imprese (PMI) che, sul piano dell'occupazione, impiegano il 78,8% degli addetti delle imprese (Confartigianato, 2017). L'Italia supera il valore medio europeo di addetti in PMI, che è pari a 69,4%. Le PMI hanno quindi un ruolo fondamentale

Aziende afferenti al codice ATECO 16.10
Taglio e piallatura del legno
(CARPENTERIE)
nell'area del Nordest su territorio nazionale



Aziende afferenti al codice ATECO 16.23.2
Fabbricazione di altri prodotti di carpenteria in legno e falegnameria per l'edilizia
(FALEGNAMERIE)





Aziende afferenti al codice ATECO 16.10 "Taglio e piallatura del legno" (CARPENTERIE)

Aziende afferenti al codice ATECO 16.23.2 "Fabbricazione di altri prodotti di carpenteria in legno e falegnameria per l'edilizia" (FALEGNAMERIE)

Impresa	N. dip	N. aziende	%
Media Occupati 50-249; Fatturato <50 mil €	Oltre i 100	6	0,8
	50-99	16	
Piccola Occupati 10-49; Fatturato <10 mil €	30-49	24	8,3
	10-29	235	
Micro impresa Occupati <10; Fatturato <2 mil €	2-9	860	91
	0-1	1.971	

Regione	Città	ATECO 16.10	ATECO 16.23.2	Totale	Numero di dipendenti	Media % numero di dipendenti
Friuli Venezia Giulia	Gorizia (GO)	21	14	35	98	2,80
	Pordenone (PN)	36	86	122	519	4,25
	Trieste (TS)	7	27	34	20	0,59
	Udine (UD)	168	158	326	1.063	3,26
Trentino Alto Adige	Bolzano (BZ)	104	581	685	3.081	4,50
	Trento (TN)	85	322	407	1.180	2,90
Veneto	Belluno (BL)	37	163	200	343	1,72
	Padova (PD)	33	194	227	546	2,41
	Rovigo (RO)	10	37	47	60	1,28
	Treviso (TV)	120	207	327	1.945	5,95
	Venezia (VE)	26	173	199	703	3,53
	Vicenza (VI)	83	197	280	772	2,76
	Verona (VR)	40	183	223	251	1,13
	Nordest	770	2342	3.112	10.581	3,40

07. Le carpenterie e le falegnamerie nel territorio del Nordest, suddivise per città (fonte Registro Imprese Telemaco, 2017).

per l'economia italiana e il loro grado di innovazione può contribuire in maniera significativa all'economia di un territorio e della nazione tutta. Nell'area del Nordest si concentra un elevato numero di PMI, afferenti a diverse classi merceologiche, oltre che quelle in oggetto di indagine: questa eterogeneità può essere considerata motore di sviluppo e di innovazione nel settore manifatturiero.

4.3 La definizione della popolazione

Al fine di sviluppare un'indagine rappresentativa del territorio del Nordest, è stato necessario definire il campione di popolazione a cui inviare il questionario.

In funzione al limite merceologico e al limite geografico precedentemente descritti, la ricerca si è sviluppata a partire dai dati forniti dalla Camera di Commercio di Venezia Belluno Delta Lagunare (ottobre 2017). Le aziende con sede nel Nordest e operanti nelle classi merceologiche ATECO 16.10 e/o 16.23.2 sono 3122 e rappresentano il 20% del settore manifatturiero nazionale riferito ai codici ATECO 16.10 e 16.23.2 (Telemaco, Registro Imprese a novembre 2017).

In funzione al limite strumentale, al fine di comprendere se vi siano relazioni tra numero di dipendenti e impiego degli strumenti dell'automazione, è stato scelto di intervistare aziende di dimensione differente (dalle micro alle grandi): tale considerazione è fondata sulle stime che Confartigianato propone sulla base dei dati Ocse[33] (Confartigianato, 2017). Nei trimestri del 2015 e del 2016, il settore manifatturiero italiano costituito da Micro e Piccole imprese ha registrato una crescita che risulta significativa soprattutto se paragonata alla media europea; tra i fattori che hanno innescato questa crescita, Confartigianato riconosce anche la digitalizzazione dei processi produttivi, aspetto che si accentua nel caso di Micro e Grandi imprese, per le quali l'efficienza tecnica ha fornito un apporto più positivo rispetto a quello registrato dalle Piccole e Medie.

Al fine di indagare il legame tra il *know how* storico e l'ampliamento delle possibili lavorazioni concesse dall'automazione (con l'intento di individuare eccellenze manifatturiere che attestano il valore dell'*headmade*) è stato scelto di interrogare aziende con differenti date di fondazione, individuando le realtà di più antica presenza sul territorio del Nordest e provando a sondare il numero delle aziende di più recente fondazione. Quest'ultimo parametro è risultato inefficace nella selezione del campione poiché l'elenco delle aziende di recente formazione indicizzate nel Registro delle Imprese (2017) non era corredato dei dati necessari a costruire un dialogo: non era chiara la tipologia di attività, non erano disponibili recapiti e, qualora questi fossero presenti, essi non risultavano attivi. Interrogati nel merito, i responsabili del Registro delle Imprese hanno spiegato che spesso le imprese di recente formazione sono dichiarazioni di intenti o primi strumenti dedicati alla definizione di nuove attività ad opera di addetti che da tempo operano nel settore. Le motivazioni di tali nuove fondazioni d'impresa, spesso, coincidono con il desiderio o con il tentativo di recepire finanziamenti o agevolazioni regionali derivati da finanziamenti europei o similari. Alcune di queste imprese sono dunque destinate ad essere chiuse dopo un breve periodo, altre diverranno realtà effettivamente operative una volta assestata la rete di relazioni ed economie in corso di definizione. La selezione del campione di aziende è stata quindi rimodulata al fine di coinvolgere imprese storicamente affermate e tra loro diversificate sulla base di due parametri:

Parametri applicati per selezione da Registro delle Imprese	Nordest	BL	BZ	GO	PD	PN	RO	TN	TS	TV	UD	VE	VI	VR
Maggior numero dipendenti	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2
Data di fondazione più antica	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2	2+2

08. Nella tabella la sigla 2+2 corrisponde a 2 aziende afferenti al codice ATECO 16.10 e 2 aziende afferenti al codice ATECO 16.23.2.

- la data di fondazione più antica, che identifica le aziende che vantano una tradizione manifatturiera che può essere indice di capacità di trasformazione o può costituire anche una motivazione per la naturale diffidenza del settore edile nei confronti dell'innovazione;
- il numero di dipendenti che consente di riconoscere le aziende grandi che, presumibilmente, hanno maggiore disponibilità di sviluppare investimenti economici per innovazioni e aggiornamenti della produzione e le aziende piccole che, si immagina, rimangono attive sul mercato nel tempo grazie al *know how* d'eccellenza, che spesso ha tradizione familiare e quindi risiede in aziende di dimensione familiare.

Una volta definito il campione d'indagine (fig. 08) è stata effettuata un'attività di verifica che ha rilevato, per alcune imprese, l'impossibilità di reperire dati (mancanza dei principali recapiti, come indirizzi mail o numeri di telefono) o di riconoscerne l'operatività all'interno del settore edile (incoerenza tra codice ATECO di appartenenza e attività reale). Queste problematicità si distribuiscono uniformemente sul territorio del Nordest, ad eccezione che per le province di Gorizia, Rovigo e Trieste, per le quali non è stato possibile contattare alcun tipo di azienda (concausa è il ridotto numero di aziende presente sul loro territorio). D'altro canto, le associazioni di categoria ed enti promotori dei differenti territori[34] contattati durante la definizione della popolazione del questionario, hanno contribuito ad affinare la selezione, contattando aziende direttamente coinvolte nel settore edile e predisposte alla partecipazione al questionario.

A valle di tali considerazioni, è stato definito un campione di 112 aziende.

4.4 Struttura e contenuti

Lo strumento di indagine redatto per condurre la ricerca è stato un questionario online, strutturato al fine di raccogliere i dati in maniera omogenea e fornire uno strumento d'indagine capace di adattarsi alle differenti tipologie di interlocutore. Obiettivo del questionario non è individuare le aziende più innovative, bensì indagare le ragioni che spingono o che frenano un'azienda a investire nell'automazione; il questionario è anche utile ad aprire un dialogo con i titolari delle imprese e a comprendere le loro posizioni nei confronti delle nuove tecnologie. Il questionario è stato sviluppato per essere uno strumento di dialogo[35] e di confronto: ha consentito di identificare punti comuni tra due visioni spesso erroneamente considerate lontane l'una dall'altra, quella dell'accademia e quella aziendale.

Il questionario è stato intitolato "Gli strumenti della produzione - Il legno in edilizia" ed è stato strutturato in tre sezioni:

1. "Settore di lavoro": questa sezione raccoglie informazioni in merito all'attività lavorativa delle imprese intervistate, in modo da dettagliare la definizione dell'ambito operativo meglio di quanto consentano di fare i codici ATECO;

2. "Macchinari": questa sezione indaga la presenza, l'assenza o il futuro acquisto di macchine CNC e/o robot, vengono rivolte domande al fine di com-

CAMPIONE DELLE AZIENDE

L'elenco delle 112 aziende contattate per la compilazione del questionario: alcune aziende hanno risposto al questionario attraverso il modulo online, altre telefonicamente; con alcune invece è stato compilato direttamente di persona durante un incontro in azienda o in fiera. Le aziende sono riportate in ordine di provincia, i colori delle caselle distinguono i codici ATECO a cui le aziende afferiscono: in giallo codice ATECO 16.23.2, in arancio 16.1.

Segheria F.lli Colle	BL
FINBLOK	BL
Lacedelli Cortina	BL
TecnoLegno Zanon	BL
LegnoStile	BL
Segheria De Pol	BL
Legno Sud	BZ
Sarner Holz	BZ
H. Oberhofer & Co.	BZ
Segheria Weitental	BZ
Tip Top Fenster srl	BZ
Falegnameria ERLACHER	BZ
Est Feller	BZ
Lobis Elements	BZ
Untersteiner	BZ
Holzbau Birxen	BZ
Ligna Construct	BZ
Azienda Progettolegno	GO
Azienda Michelus Case Snc	GO
BS Serramenti	GO
Floriani	GO
Ronchi	GO
Ditta Bozza	PD
Gambetta Leone	PD
Famm Infissi	PD
Zennaro Serramenti	PD
Antico Legno	PD
Holzbau Thaler	PD
Campesato	PD
Ge.Co. Pannelli Srl	PN
Cozzarin Legnami	PN
ICAM Pannelli Srl	PN
Cotimber Srl	PN
Costrusion Len	PN
Falegnameria Bertolla	PN
Scodellaro	PN
Pantogri	PN
MD Serramenti	RO
Falegnameria Artigiana Papozze	RO
Artelegno	RO
Azienda FAL	TN
Legnami Bracchi Snc	TN
Dallachiesa Legnami Snc	TN
Legnami Giovannini	TN
Tecnopal	TN
Azienda ILLE Case in legno	TN
Bertamini Serramenti	TN
Carpenteria Corona Silvano	TN
Eco-Holz Srl	TN
Carpenteria Bertagnolli	TN
Anzelini Legnami	TN
Falegnameria L'Artigiano	TN
Azienda STP	TN
Nordhaus srl	TN
ILLEN	TN
Segheria Leonardi	TN
Segna Legnami Snc	TN
Ciara Legnami	TN
B e B Legno snc	TN
Bagatoli	TN
Silvestri Legnami	TN
Pavimenti	TN
Tetto Design Srl	TN
Cimadom Legnami	TN
XLAM Dolimiti	TN
De Paoli	TN
Biohabitat	TN
Lamellari Nobili	TN
Gruppo Legno	TN
Falegnameria Zeta	TS
Falegnameria Battini	TS
Azienda Garbelotto	TV
Azienda Tommasi Maronese	TV
Azienda Il Tranciato	TV
Legnami Barel Spa	TV
Falegnameria Rier	TV
Azienda ITLAS	TV
DGR Da Riva	TV
Pivato	TV
Artuso Legnami	TV
Castorlegno	TV
Essepi Compensati	UD
Italcurvati Spa	UD
Ditta Ferrara Arturo & C. S.r.l.	UD
Azienda Fratelli Minen	UD
Azienda Marinig	UD
Diemme Legno Snc	UD
Hoeller	UD
Fratelli Picco	UD
Romea Legnami	VE
Busatto Bellarmino Srl	VE
Der Wood	VE
Salvador Parquet	VE
Azienda Punto Ciemme	VE
Capovilla	VE
Bozza Cav. Rainieri & C. Snc	VE
Ragazzo	VE
Corà Legnami	VI
Latifoglia Srl	VI
Paterno Daniel Srl	VI
Bonetto Legno	VI
Carretta Serramenti	VI
Falegnameria Gambin&Donello	VI
Gebrueder	VI
Lovato Legnami	VR
Franchini Legnami	VR
Segheria Da Como	VR
Nicoletti Legnami	VR
Affi NT	VR
Brutti Serramenti	VR
Falegnameria Cereghini	VR
Lessina Legnami Snc	VR

prendere i principali motivi di queste scelte e le condizioni che hanno permesso o impedito l'acquisto di macchinari;

3. "Sviluppo della produzione": questa sezione approfondisce il tema dei campi di impiego delle macchine legando questi ad un'idea di sviluppo della produzione che, oltre a sondare le intenzioni in merito a possibili investimenti futuri, affronta anche il tema dell'eventuale sottoutilizzo delle macchine a controllo numerico e/o dei robot.

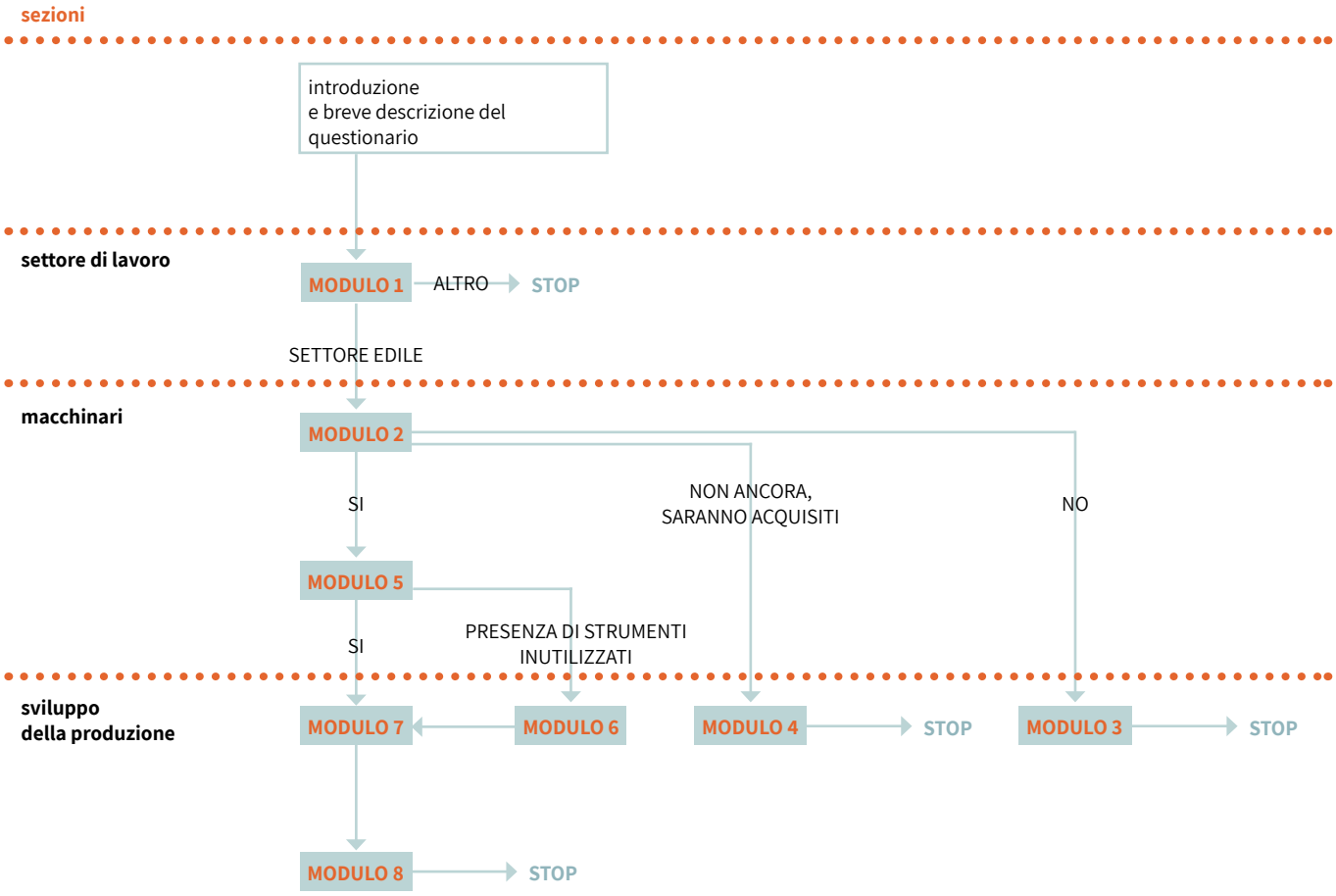
Ciascuna sezione è stata suddivisa in moduli che si attivano sulla base delle risposte date; grazie a questa struttura, in funzione della risposta di ciascuna sezione, il numero delle domande varia:

- al termine della sezione 1 "Settore di lavoro" il questionario si interrompe per coloro che non operano nel campo dell'edilizia;
- al termine della sezione 2 "Macchinari" il questionario si interrompe per coloro che non vogliono acquisire macchine a controllo numerico e/o robot;
- al termine della sezione 3 "Sviluppo della produzione" il questionario si interromper per coloro che acquisiranno macchine a controllo numerico e/o robot.

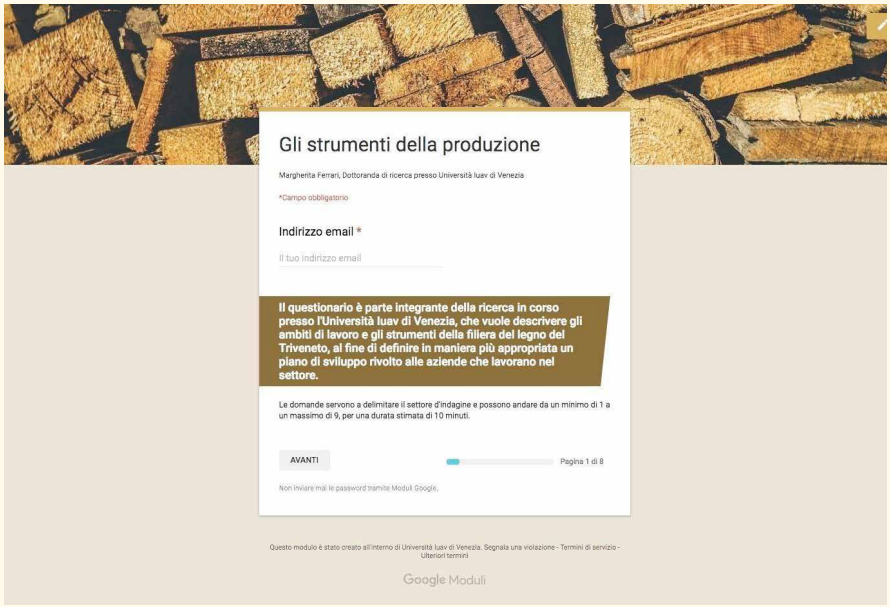
Le risposte al questionario sono state strutturate con la scala di accordo/disaccordo, adatta a misurare l'atteggiamento nei confronti di un processo come quello dell'automazione: questo sistema di indagine permette di esprimere il grado di accordo o disaccordo in riferimento a un'affermazione, senza utilizzare aggettivi o espressioni in maniera soggettiva. Ogni domanda, infine, è seguita da un campo libero in cui il partecipante può esprimere il proprio parere.

Il questionario è stato organizzato come indicato nello schema riassuntivo sottostante; nelle pagine seguenti sono riportate le schede delle domande.

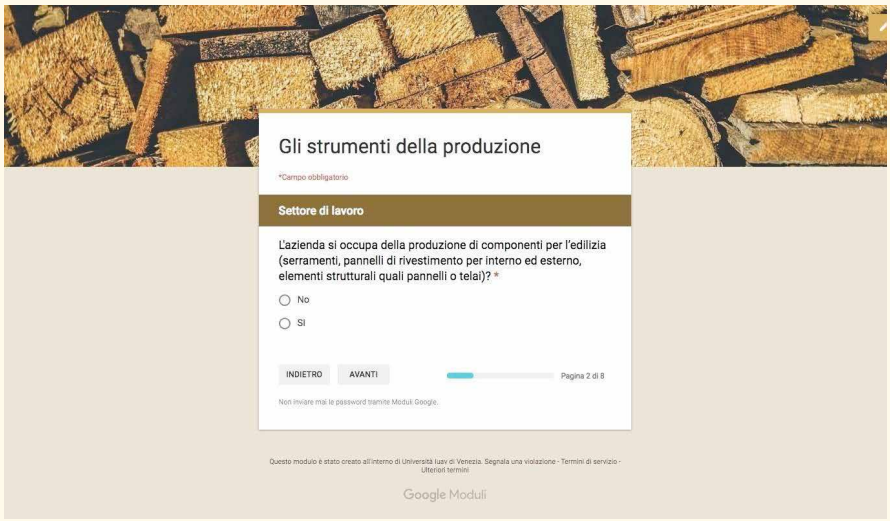
09. Schema del questionario: l'organizzazione dei moduli (domande) nelle sezioni tematiche. In funzione della risposta, si attivano differenti moduli, determinando l'approfondimento del questionario.



STRUTTURA DEL QUESTIONARIO



Introduzione



Il settore di lavoro

MODULO 1

Le aziende che si occupano della produzione di componenti per l'edilizia proseguono il questionario.
Le aziende che non rientrano in tale categoria non proseguono il questionario.

Macchinari

MODULO 2

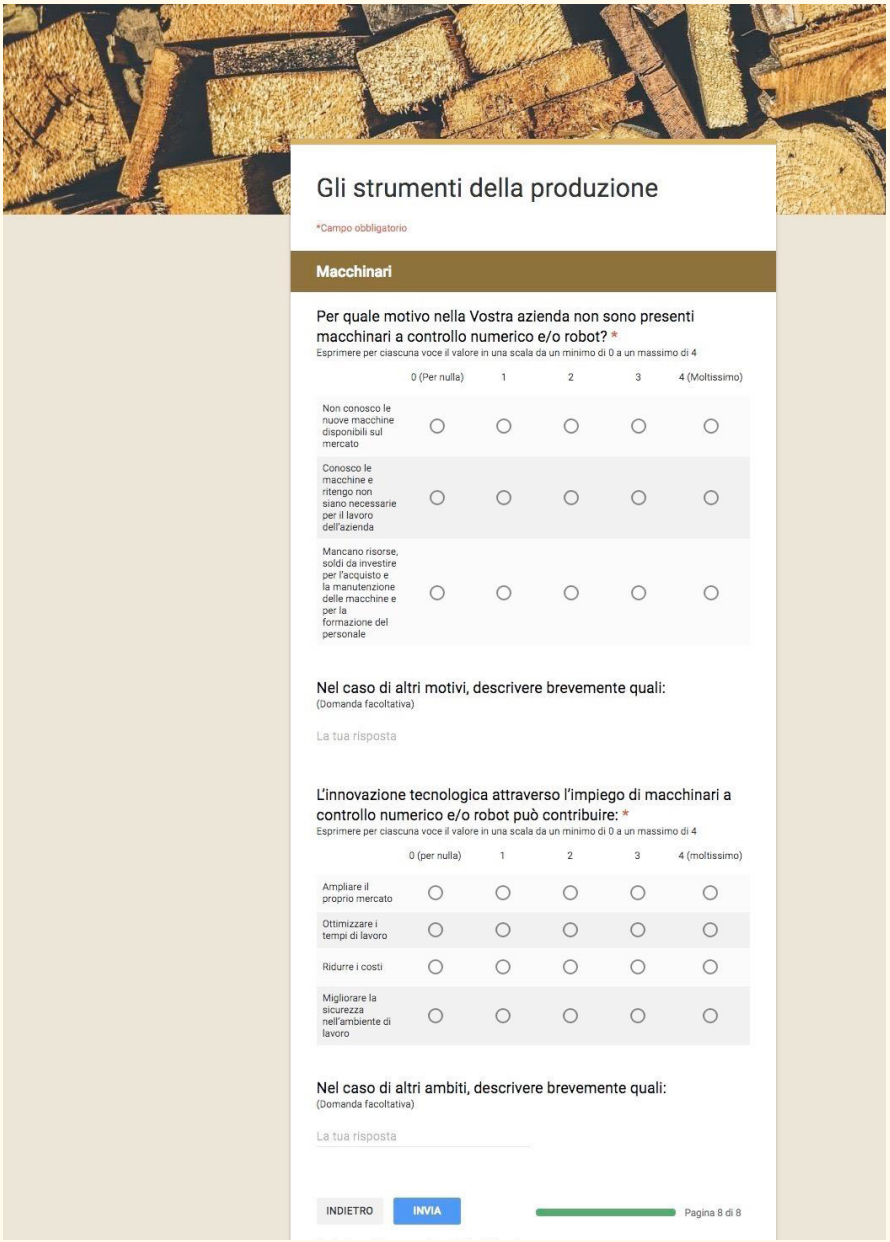
Verifica della mera presenza in azienda di macchinari a controllo numerico e/o robot.
La presente domanda veicola a 3 sezioni differenti, in base alla risposta selezionata.

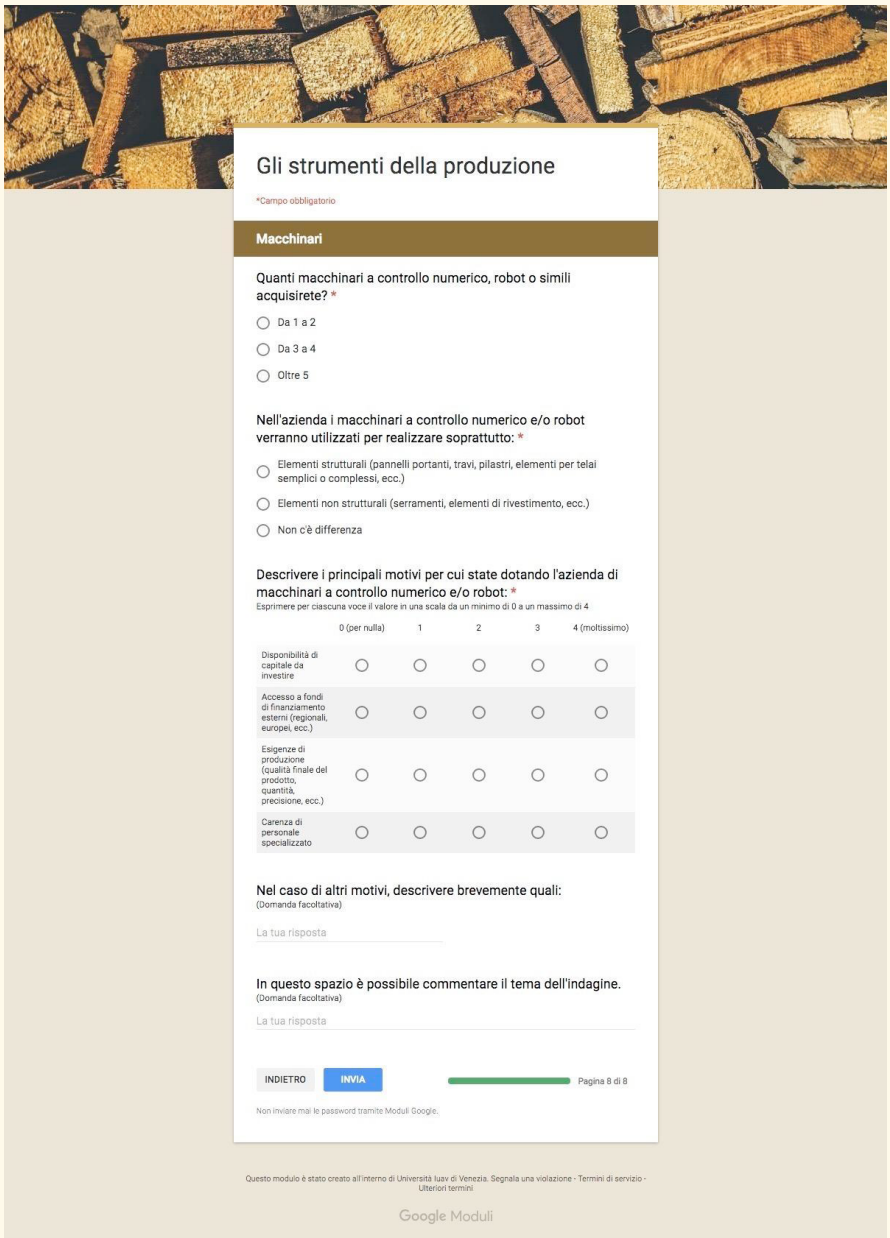


Macchinari/ Sviluppo della produzione

MODULO 3

Dedicato e coloro che hanno risposto ”No” al Modulo 2.
Si richiedono le principali ragioni per le quali l’azienda non dispone di macchinari.
Successivamente, il questionario termina con il Modulo Saluti.





Gli strumenti della produzione

*Campo obbligatorio

Macchinari

Quanti macchinari a controllo numerico, robot o simili acquisirete? *

- Da 1 a 2
- Da 3 a 4
- Oltre 5

Nell'azienda i macchinari a controllo numerico e/o robot verranno utilizzati per realizzare soprattutto: *

- Elementi strutturali (pannelli portanti, travi, pilastri, elementi per telai semplici o complessi, ecc.)
- Elementi non strutturali (serramenti, elementi di rivestimento, ecc.)
- Non c'è differenza

Descrivere i principali motivi per cui state dotando l'azienda di macchinari a controllo numerico e/o robot: *

Esprimere per ciascuna voce il valore in una scala da un minimo di 0 a un massimo di 4

	0 (per nulla)	1	2	3	4 (moltissimo)
Disponibilità di capitale da investire	○	○	○	○	○
Accesso a fondi di finanziamento esterni (regionali, europei, ecc.)	○	○	○	○	○
Esigenze di produzione (qualità finale del prodotto, quantità, precisione, ecc.)	○	○	○	○	○
Carenza di personale specializzato	○	○	○	○	○

Nel caso di altri motivi, descrivere brevemente quali:
(Domanda facoltativa)

La tua risposta

In questo spazio è possibile commentare il tema dell'indagine.
(Domanda facoltativa)

La tua risposta

INDIETRO INVIA Pagina 8 di 8

Non inviare mai le password tramite Moduli Google.

Questo modulo è stato creato all'interno di Università Iuav di Venezia. Segnala una violazione - Termini di servizio - Ulteriori termini

Google Moduli

Macchinari/ Sviluppo della produzione

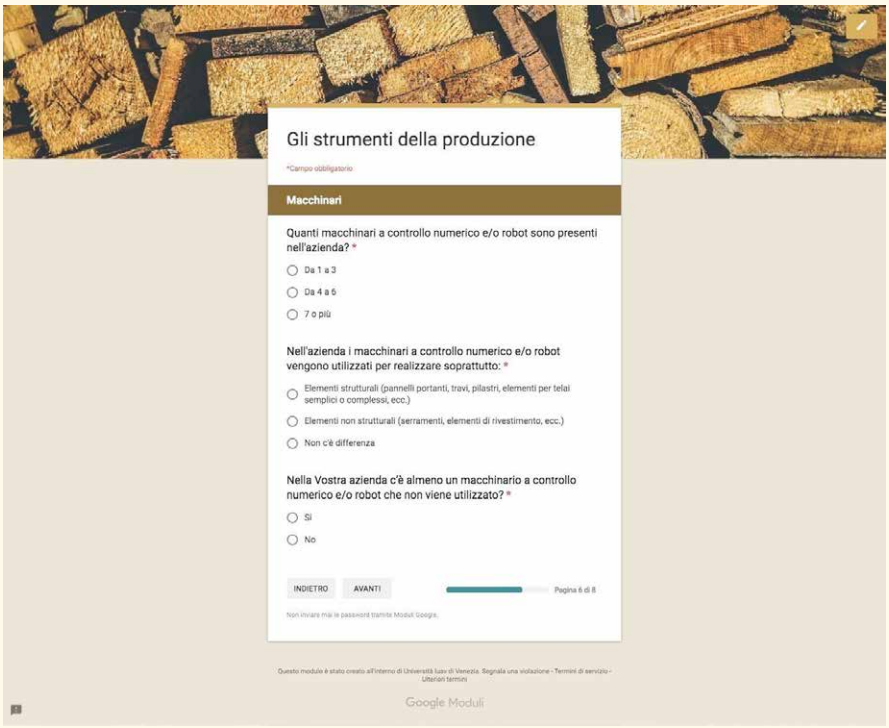
MODULO 4

Dedicato a coloro che hanno risposto ”Non ancora, ma a breve saranno acquisiti” al Modulo 2.
Si richiede la destinazione d’uso e le ragioni dell’acquisto di macchinari.
Successivamente, il questionario termina con il Modulo Saluti.

Macchinari

MODULO 5

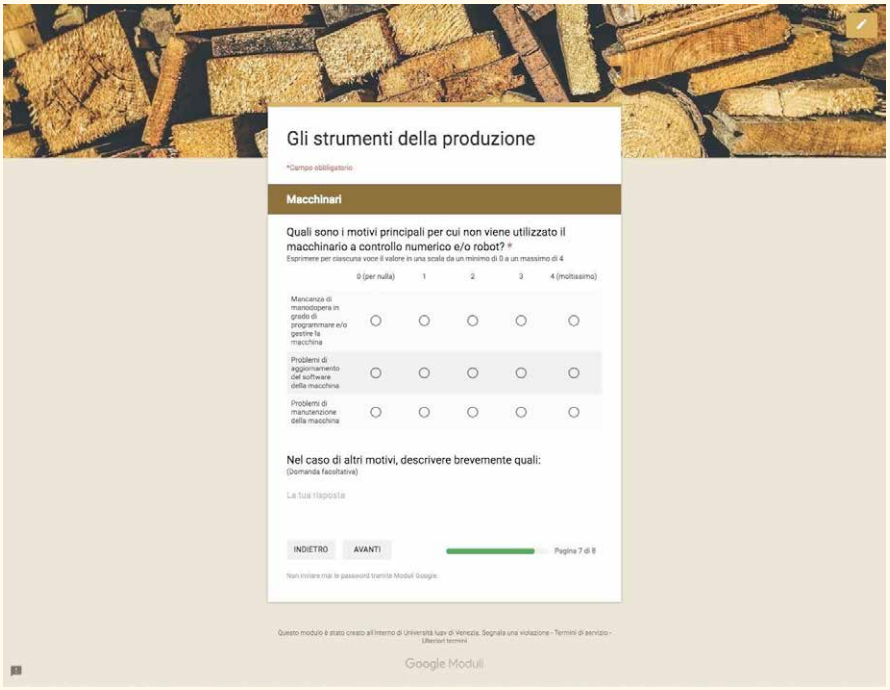
Dedicato a coloro che hanno risposto ”Si” al Modulo 2.
Si richiede il numero di macchinari e la tipologia d’impiego che ne viene fatto.
Nel caso di macchinari non utilizzati, si rinvia al Modulo 6.
Per coloro che non dispongono di macchinari inutilizzati, si rinvia a Modulo 7.

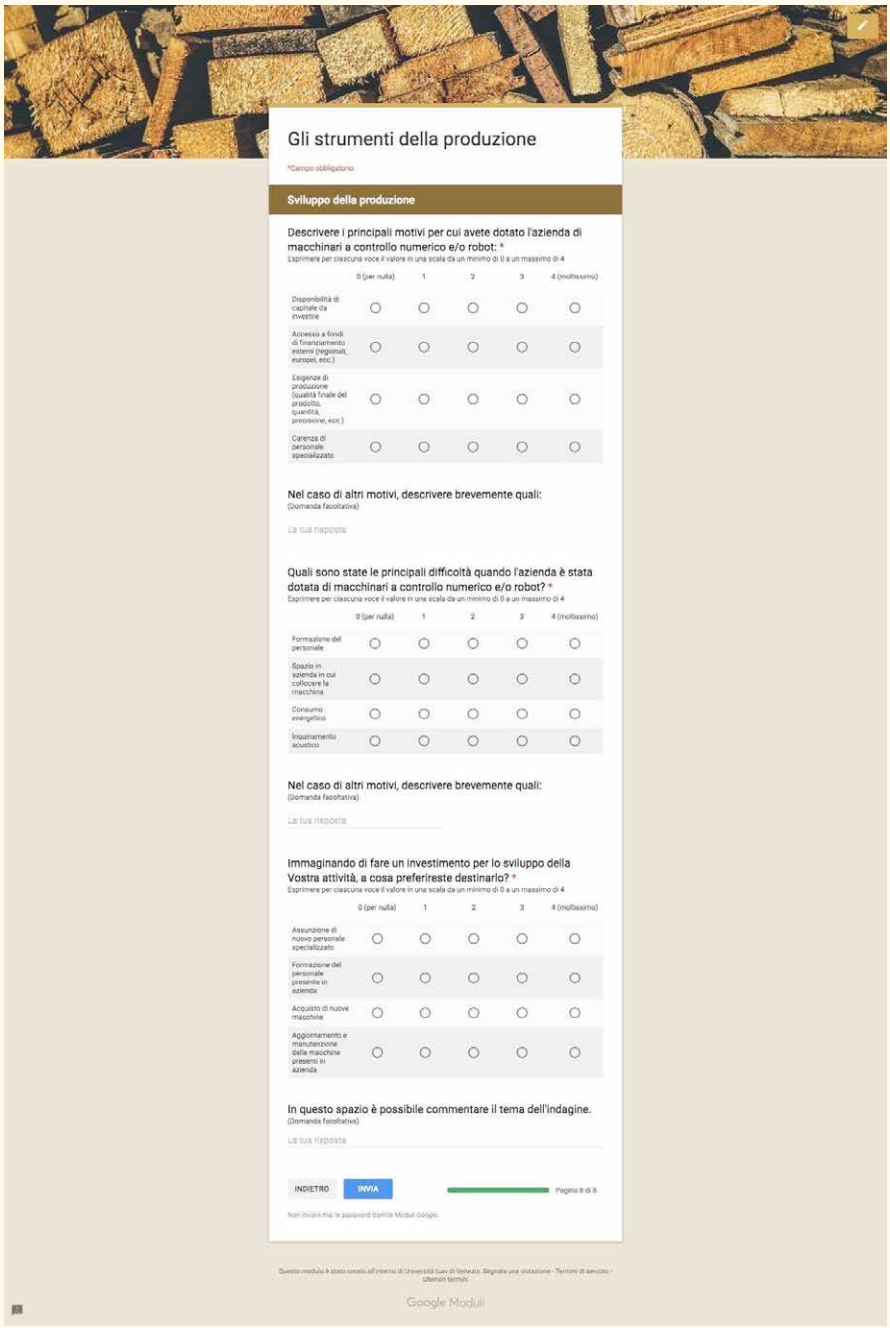


Macchinari

MODULO 6

Dedicato a coloro che nel Modulo 5 hanno dichiarato di essere in possesso di macchinari che non utilizzano.
Si richiedono le ragioni per cui tale strumento non viene utilizzato.
Successivamente si rinvia a Modulo 7.





Sviluppo della produzione

MODULO 7

Dedicato a coloro che hanno compilato il Modulo 6 oppure il Modulo 5.
Si chiedono le ragioni che hanno portato l'azienda ad acquisire macchinari, le difficoltà riscontrate nel loro inserimento in azienda e le prospettive future sulla base della propria esperienza.
Successivamente, il questionario termina con il Modulo Saluti.



Saluti

MODULO 8

Registrazione della risposta.

4.5 Raccolta dei dati ed esiti

La fase di raccolta dei dati è durata da dicembre 2017 a giugno 2018. Le aziende sono state contattate sia tramite mail che tramite telefonata diretta, ciò ha permesso di discutere e, in alcuni casi, di approfondire il tema d'indagine anche attraverso alcune interviste dirette e visite presso le aziende.

La partecipazione al sondaggio è stata pari al 21%, percentuale che rappresenta un risultato soddisfacente (per la tipologia di sondaggio effettuato)[36] e i dati raccolti descrivono situazioni molto differenti, in cui l'impiego dell'automazione e della robotica hanno ruoli e considerazioni a volte anche contrastanti tra loro.

Il 73% delle aziende che hanno risposto al sondaggio, ha dichiarato di utilizzare o di essere in fase di acquisto di robot per la propria attività: di queste, circa il 60% impiega il robot per la realizzazione di elementi strutturali per l'edilizia, mentre il restante lo utilizza per la realizzazione di componenti non strutturali.

Le ragioni che hanno spinto le aziende a inserire nella propria linea di produzione i robot, sono strettamente legate a esigenze di produzione in termini di qualità e precisione (92%); una buona percentuale delle imprese che hanno risposto al questionario impiega le macchine per compensare la mancanza di personale (50%).

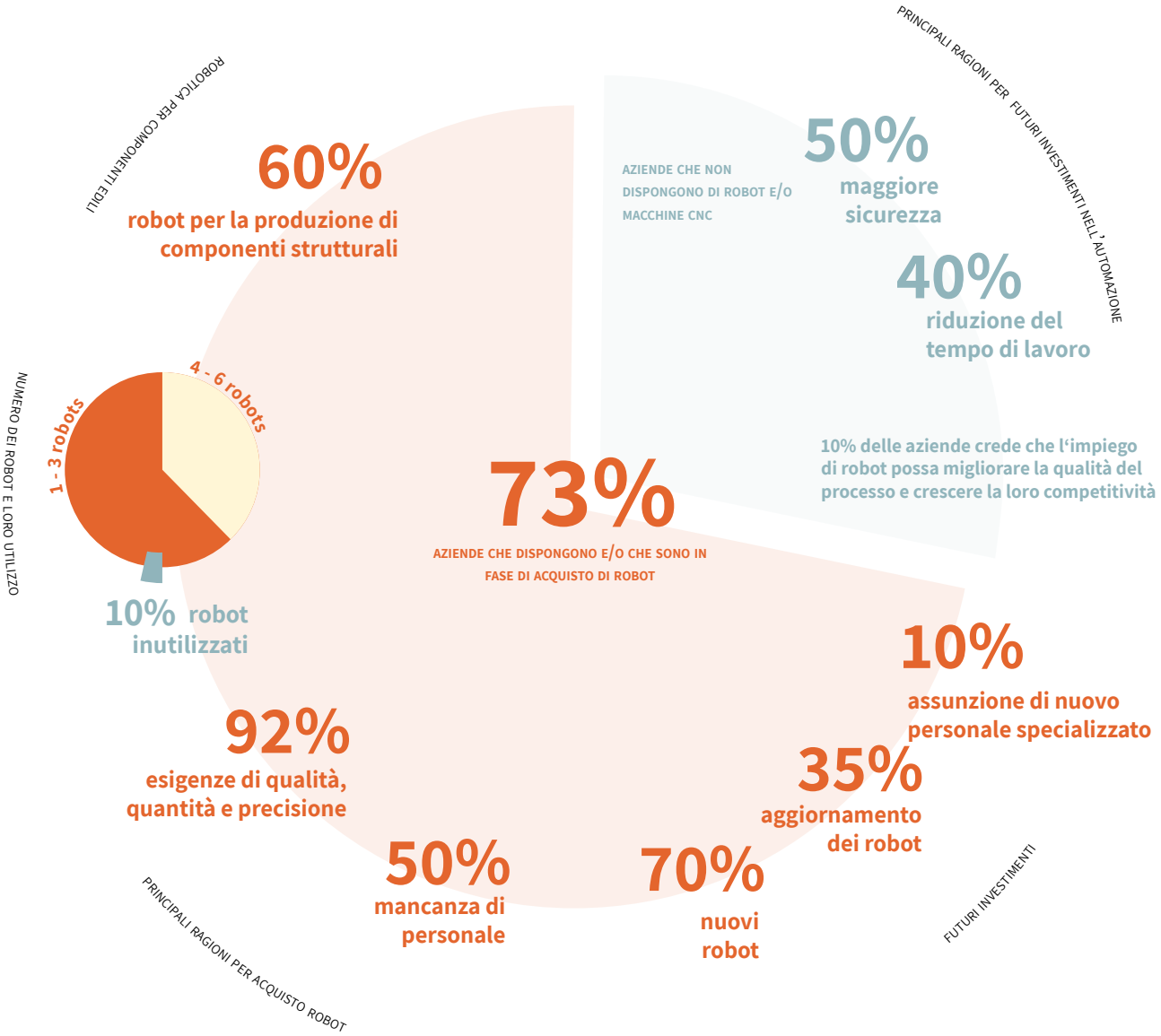
Le imprese dispongono mediamente da 1 a 3 robot, il 30% ne impiega dai 4 ai 6 e a questa categoria appartengono la maggioranza delle aziende che impiegano il più alto numero di dipendenti. Il 10% degli intervistati dichiara di possedere robot e di non utilizzarli, non vengono fornite motivazioni di tale condizione che può quindi essere legata alla mancanza di manodopera in grado di programmare e/o gestire la macchina, a problemi di aggiornamento dei software della macchina o a problemi di manutenzione meccanica della macchina.

Il 75% delle aziende ha investito nell'automazione grazie al supporto di finanziamenti esterni, poiché la disponibilità di capitali propri era nulla o molto bassa per questa tipologia di spesa. Queste stesse aziende, immaginando il futuro, desiderano investire nuovamente in tecnologia attraverso l'aggiornamento delle risorse, sia umane che meccaniche: tale tendenza attesta la fiducia delle imprese nei confronti dell'automazione e della robotica che, presumibilmente, hanno già portato beneficio alla produzione.

L'impiego dei robot nell'azienda non ha creato problemi di inquinamento acustico o legati al consumo energetico, perché preventivamente calcolato: le difficoltà principali sono invece legate allo spazio in cui disporre la macchina all'interno dell'azienda (54%) e, soprattutto, alla formazione del personale (61%).

Solamente il 10% delle imprese, immaginando di fare un investimento per lo sviluppo dell'attività, vorrebbe assumere personale specializzato, preparato per l'utilizzo e lo sviluppo della robotica. La tendenza generale è infatti quella di preferire l'acquisto di nuovi robot (70%) all'aggiornamento di quelli già in uso (35%).

Il 27% delle aziende non possiede robot e questa condizione viene imputata principalmente alla mancanza di risorse economiche: questa fascia di aziende dichiara inoltre che, osservati i macchinari disponibili, l'automazione non è adatta al proprio settore di mercato. Queste stesse imprese ritengono che l'innovazione tecnologica, attraverso l'impiego di robot, possa contribuire a ottimizzare i tempi di lavoro e a rendere più sicure alcune specifiche lavorazioni; non credono tuttavia che l'impiego dei robot possa avere riscontri economici positivi per l'economia dell'azienda, in quanto non è garantita una riduzione dei costi e un ampliamento del mercato.



10. Alcuni dei risultati ottenuti attraverso la compilazione del questionario. Nello schema con il termine "robot" si fa riferimento sia a bracci robotici che a macchine a controllo numerico.

Il questionario ha consentito la raccolta di dati e la rendicontazione di valori percentuali per la differenti questioni poste alle aziende (fig. 10); ha inoltre consentito di stabilire dei contatti con le aziende presso alcune delle quali sono state condotte visite in stabilimento. Nella fase di raccolta dati, circa una settantina di aziende sono state contattate telefonicamente e circa il 10% di queste aziende ha dichiarato che non percepisce l'utilità degli strumenti dell'automazione per lo svolgimento della propria attività produttiva; con il 5% delle aziende è stato possibile costruire un confronto diretto e il questionario è quindi stato compilato tramite intervista telefonica. Quattro aziende sono state intervistate durante una visita in stabilimento: sebbene queste realtà produttive appartengano a contesti geografici molto differenti, con conseguenti supporti amministrativi differenti (ad esempio la disponibilità di finanziamenti da parte della propria regione per l'acquisto macchinari o la formazione), tutte sono accomunate da un forte interesse nella crescita aziendale in relazione allo sviluppo di attività di ricerca anche in collaborazione con l'Università.

Le 4 aziende sono situate nelle province di Belluno, Bolzano, Treviso, Venezia e hanno dimensioni molto differenti l'una dall'altra, dalla Micro Impresa, che conta pochi artigiani, alla Piccola Impresa con circa 40 dipendenti distribuiti nei comparti di produzione e negli uffici tecnici. Ciascuna di queste aziende è in possesso di macchinari acquistati negli anni Ottanta e Novanta; sono macchinari di diversa tipologia e dimensione ed impiegati per dell'attività di prima lavorazione (operazioni su tronchi) o di seconda lavorazione (operazioni su semilavorati in legno come tavole o travi). Ciò che emerge dalle interviste condotte presso queste 4 aziende è la percepita mancanza di legislazione in materia di automazione e non solo; si auspica l'intervento dello Stato o dell'UE al fine di definire standard o linee guida utili a coinvolgere l'intera filiera del legno, per salvaguardare la crescita e il mantenimento dei boschi, e per incentivare l'impiego del legno in edilizia. La tecnologia, attraverso l'automazione e la robotica, può rappresentare un valore aggiunto per la propria attività, ma non può contribuire al benessere dell'azienda se il settore non viene tutelato definendo standard qualitativi che consentano di premiare le eccellenze nel campo della produzione di materia prima e della realizzazione di strutture altamente performanti.

Le interviste hanno confermato quanto emerso dai dati raccolti tramite questionario: è forte il desiderio di aggiornamento tecnologico e di investimento in nuovi macchinari e le difficoltà maggiori nell'intraprendere tale percorso si rilevano nel mancato e necessario aggiornamento professionale del personale. Le ragioni di tale difficoltà derivano sia da limiti tecnici, ovvero dalla mancanza di tempo da dedicare all'attività di formazione, che da limiti di natura culturale. In quest'ultimo caso, più complesso, gli operatori dell'azienda spesso non hanno competenze appropriate per approcciare lo studio dell'automazione o, a priori, non fanno valore alle attività di formazione; in altri casi si è riscontrato che il personale docente che è impegnato nelle attività di formazione offre informazioni di carattere troppo generalista che risulta quindi lacunoso dal punto di vista delle informazioni e delle istruzioni tecniche che risultano immediatamente utili per il lavoro in azienda. Questo genere di lacune deriva soprattutto dalla normale distanza che si riconosce tra il fare e il sapere in un momento in cui è grande la trasformazione delle lavorazioni e dei fondamenti della formazione; sono richiesti sforzi congiunti da entrambe le parti al fine di definire con precisione gli ambiti di interesse principale sia al fine della messa a frutto delle macchine già disponibili sul mercato, sia per la progettazione delle nuove strumentazioni, per le future innovazioni della progettazione e della produzione. Ciò che dunque risulta mancare è quella capacità di mettere in relazione prestazioni ed esigenze che sono, attualmente, descritte attraverso linguaggi e pensieri differenti e non sempre compresi dall'interlocutore di turno.

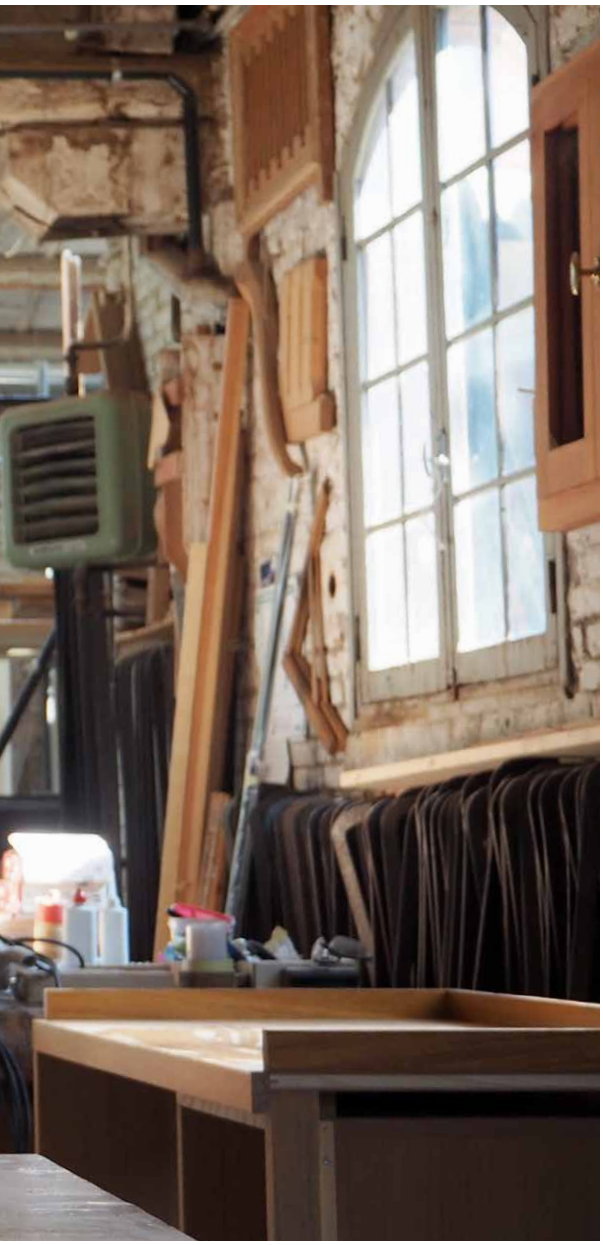
I risultati raccolti ricostruiscono un quadro complesso e articolato poiché ogni intervistato è fortemente influenzato dai molti aspetti che definiscono la vasta filiera del legno. Il quadro complessivo non è esaustivo nel merito della descrizione degli strumenti da lavoro che l'automazione fornisce o potenzia ed è complessa una valutazione nel merito delle modalità con cui vengono impiegati i robot e le macchine CNC e delle capacità degli artigiani e dei carpentieri di piegare o, meglio, di programmare le macchine in funzione degli specifici compiti e dei più vari casi progettuali che si avvicendano in stabilimento.



11. Interno di una falegnameria veneziana, in cui sono presenti numerosi strumenti ad uso manuale e alcune macchine utensili per la foratura e la piallatura.

4.6 Esiti ed analisi critica

Le principali criticità emerse dall'indagine sono la mancanza di una tutela per il settore manifatturiero del legno (sul quale continuano a intervenire le associazioni di categoria e i consorzi) e la scarsa utilità delle attività di formazione all'impiego di robot o di macchine CNC (che risultano poco utili per il personale). Questo secondo punto influenza anche un altro aspetto: sebbene il 73% delle aziende partecipanti al sondaggio abbia dichiarato di utilizzare o di essere in fase di acquisto di robot, non è stato possibile sondare il grado di automazione e le modalità di impiego delle macchine. Un settore in fase di trasformazione non ancora supportato da una terminologia omogenea, che fonda parte del proprio vantaggio di mercato sul segreto aziendale, difficilmente è ben disposto alla descrizione degli aspetti più tecnici e più caratterizzanti il proprio lavoro. Non sempre gli intervistati conoscono la differenze che distinguono le macchine CNC dai bracci robotici, poiché valutano le lavorazioni esclusivamente in funzione dei prodotti finiti e non in relazione al processo di lavorazione che ne



consente l'ottenimento. Allo stesso tempo, la lavorazione di dettaglio effettuata su dei componenti standard (ad esempio la dimensione della mortasa in testa di una trave, realizzata variando le dimensioni di un modello di mortasa) viene considerata al pari della modellazione completa di un componente nuovo e progettato in funzione di uno specifico contesto.

L'automazione, come descrivono i dati del sondaggio e come riportato da alcuni professionisti durante le interviste dirette, non è considerata con una connotazione negativa ma è ritenuta adatta solo per specifiche tipologie di produzione, standardizzate e caratterizzate dalla produzione di grandi quantitativi di prodotti. Questo secondo aspetto determina il confine tra l'impiego tradizionale e l'impiego innovativo delle macchine dell'automazione e rimanda il tipo di macchina associata dagli intervistati al concetto di automazione, cioè alle macchine a controllo numerico (e non al braccio robotico).

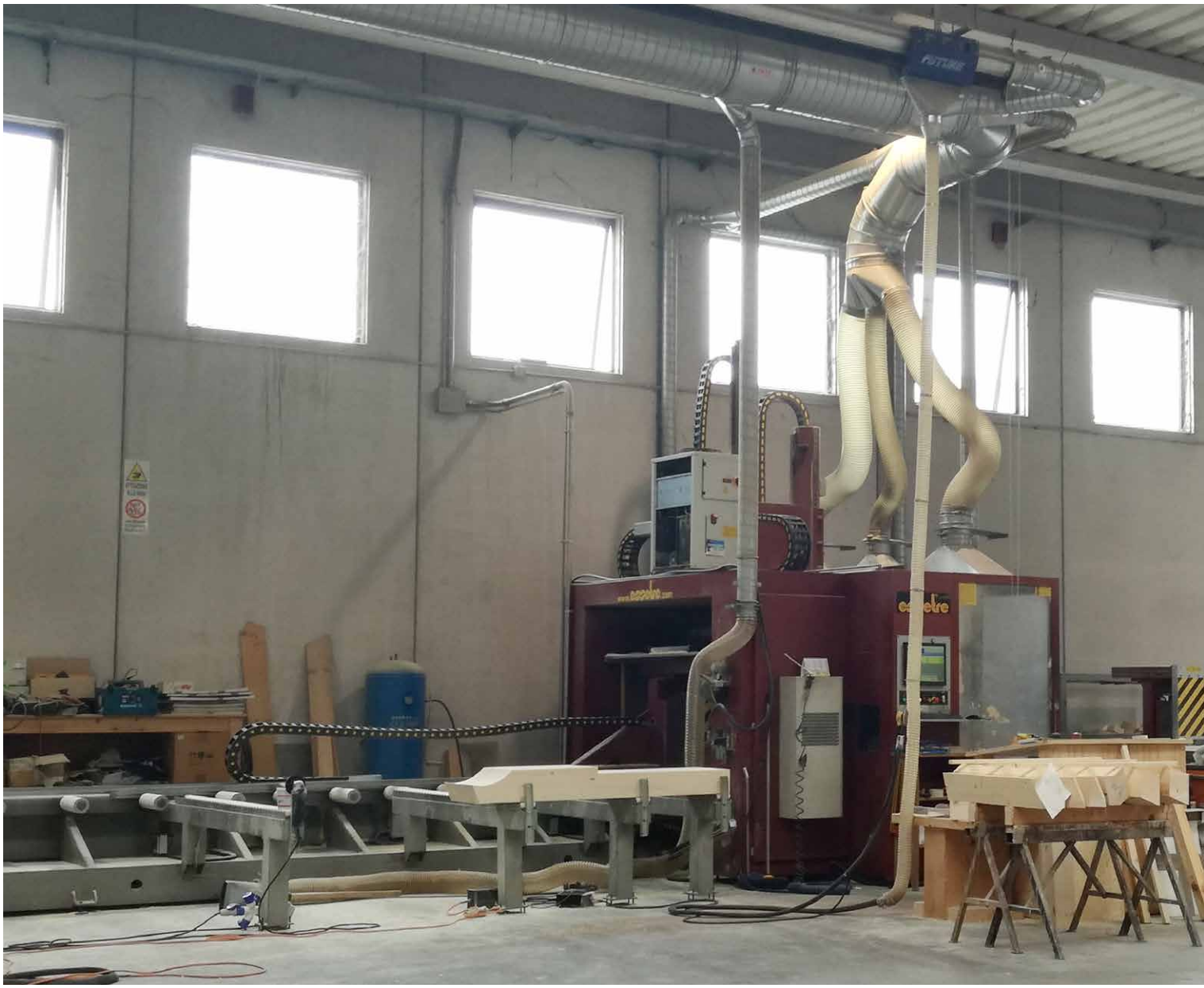
Le macchine CNC sono impiegate nella carpenteria lignea a partire dagli anni Ottanta[37] ma è solo negli ultimi 10 anni che questa tecnologia è stata ampiamente adottata e, con essa, sono stati impiegati diffusamente anche i software che permettono di interfacciare il disegno CAD con il modello produttivo CAM (fig. 12).

I software più comuni[38] dispongono di comandi e modelli di lavorazione preimpostati, soprattutto nel caso di elementi utilizzati per le coperture, produzione che ha trovato ampio sviluppo nell'area del Nordest e che quindi ha spinto molti produttori a utilizzare software per ottimizzare i tempi di progettazione dei giunti e per rendere più proficua la loro produzione. Per tali ragioni, l'automazione è ancora diffusamente relazionata all'idea di sviluppo di una produzione standardizzata, sia per i vincoli imposti dalle macchine (le CNC) che per quelli legati alla prassi d'impiego dei software, che non facilitano o non sempre permettono una libera modellazione degli elementi.

La robotica, grazie alla conformazione del braccio robotico e alla programmazione attraverso software, consente di effettuare lavorazioni e produzioni diversificate, tuttavia non è ancora diffuso il pieno sfruttamento di queste opportunità, soprattutto nella manifattura di componenti strutturali lignei[39]. Gli unici casi in cui è stato possibile osservare l'impiego di un braccio robotico riferiscono a due aziende della provincia di Bolzano[40] e, in entrambe i casi, i robot vengono utilizzati per operazioni di carattere seriale, per ottenere specifiche geometrie sul prodotto finale.

Mancano i progetti che sfruttano appieno l'automazione, di conseguenza le carpenterie non introducono variabili nella produzione, non sfruttano la gamma ampia di lavorazioni che le loro macchine sono in grado di eseguire e spesso non conoscono le effettive potenzialità insite nella relazione tra gli strumenti dell'automazione e il *know how* interno all'azienda. Non solo le carpenterie, quindi, sono in difetto nei confronti della formazione nel merito dell'automazione; anche e soprattutto chi progetta e chi investe nella progettazione deve essere informato, formato e aggiornato in merito alle potenzialità espressive che nuovi materiali e nuove tecnologie offrono all'evoluzione del linguaggio architettonico, formale e strutturale delle costruzioni in legno.

Le potenzialità dell'automazione, che possono entrare nelle imprese attraverso l'impiego di utensili di robotica, si moltiplicano laddove si arrivi a programmare gli strumenti produttivi in maniera flessibile, per permettere alla progettazione di determinare la morfologia degli elementi senza che questa sia vincolata ai parametri preimpostati nei software di base. Le potenzialità dell'automazione troveranno la giusta espressione in termini architettonici quando i progettisti



12. Centro di taglio di una carpenteria trevigiana: il funzionamento di tale macchina è seguito da un solo operaio. Il contributo di un secondo operaio è richiesto solamente per la movimentazione dei pezzi.

diverranno attenti alle innovazioni tecnologiche e accetteranno la sfida di sviluppare nuovi linguaggi per materiali, prodotti e soluzioni costruttive potenzialmente nuovi e certamente innovativi.

Questa trasformazioni premettono il cambiamento del mercato oltre i confini del Nordest. Oggi nel mercato italiano sono disponibili prodotti lignei di prima e seconda lavorazione importati da paesi confinanti (principalmente Svizzera, Austria o Slovenia) dove il mercato del legno ha sempre avuto un ruolo importante per l'economia nazionale. Questi prodotti si pongono in modo competitivo nei confronti di analoghi lavorati all'interno dei confini nazionali, soprattutto considerando che in Italia la produzione di elementi lignei strutturali si è evoluta lentamente e ha ancora margini di sviluppo prima di raggiungere i livelli di produzione dei Paesi confinanti. In una condizione simile di mercato, l'impiego dell'automazione, utile anche allo sviluppo dell'*headmade*, può contribuire ad affermare la competitività un'azienda, indipendentemente dalla sua dimensione e contribuire alla produzione di una carpenteria lignea a misura di progetto. Tale trasformazione è possibile attra-



verso il superamento degli ostacoli di natura economica e soprattutto culturale, senza il quale l'automazione rischia di non essere compresa nel pieno delle sue potenzialità.

Per superare gli ostacoli di natura economica sono ad oggi disponibili alcuni modelli di finanziamento. In Italia vi è il *Piano nazionale impresa 4.0*, che prevede investimenti per beni strumentali e informatici nelle aziende: questo provvedimento ha permesso di incrementare l'acquisto di beni strumentali e, nel caso delle macchine per la lavorazione del legno (carpenteria e falegnameria), il 2017 ha registrato una crescita del 16,7% negli investimenti per questa categoria (ACIMALL, 2018).

Superare l'ostacolo di natura culturale risulta invece più complesso: l'opposizione alla "delocalizzazione del gesto", l'affido delle operazioni manuali alle macchine, ha origini lontane, a partire dal XVIII secolo in cui le corporazioni di mestiere si opponevano all'estrema razionalizzazione del gesto produttivo e alla sua meccanizzazione attraverso lo sviluppo di macchine utensili (Picon, 1986). Nel corso degli anni la meccanizzazione si è integrata in numerosi settori manifatturieri, in alcuni è diventata indispensabile[41] ed è stata quindi accettata. Oggi l'automazione sta vivendo una forma di opposizione molto simile a quella della meccanizzazione nel XVIII secolo e affidare la produzione al gesto autonomo di un robot viene ancora da molti percepita come una trasformazione molto estranea all'uomo e viene intesa come una forma di alienazione della persona dal lavoro[42].

Nel frattempo, l'automazione impiegata all'interno delle carpenterie lignee, è spesso utilizzata per la produzione di componenti standard su cui possono essere eseguite delle variazioni parziali (come ad esempio la sagomatura della testa di una trave), una produzione che non risponde alle specificità di un progetto, senza sfruttare le potenzialità dell'automazione stessa. Uno dei vantaggi dell'automazione è la possibilità di condurre entrambe le tipologie di lavorazione, poiché l'una non esclude l'altra.

Dall'indagine è emerso il caso dell'azienda LignoAlp, in particolare del gruppo di è parte, Damiani Holz&KO S.p.A. con sede a Bressanone (BZ): si tratta di un'azienda affermata nel settore delle costruzioni in legno, una delle più note a livello nazionale. L'azienda nasce nel 1927, dalla volontà di Leonardo Damiani di coordinare 14 segherie diffuse sul territorio della Provincia di Bolzano, per la produzione di legname per il settore edile: alla fine degli anni Quaranta l'attività viene accorpata in unico stabilimento a Bressanone, per motivi gestionali. Nel 1994 l'azienda acquisisce la prima macchina CNC (oggi ne dispone due nel centro di taglio di Bressanone e una in fase di acquisto nel centro di taglio di Nova Ponente, entrambe nella Provincia di Bolzano), grazie alla quale si realizzano anche operazioni di seconda lavorazione, a partire da elementi standardizzati per le coperture e l'edilizia residenziale. Nel corso degli anni le competenze tecniche dell'azienda si sono evolute con le nuove tecnologie, sfruttando così l'automazione per la produzione di una carpenteria lignea su misura, come nel recente caso del Rifugio Oberholz (Obereggen, 2017), il cui spazio interno è scandito da telai in legno, la cui progettazione e produzione è stata resa possibile dall'impiego di questa tecnologia, attraverso il dialogo tra progettista e produttore (fig. 13).

Sebbene sia solo uno il caso riscontrato all'interno dell'indagine, non significa necessariamente che sia l'unico nell'area del Nordest. Si ricorda infatti che quest'area è fortemente caratterizzata da un elevato numero di micro-piccole-medie imprese, potenzialmente capaci di sfruttare la tecnologia dell'automa-



13. Parti prefabbricate in legno della copertura del rifugio Oberholz, realizzato a Obereggen (BZ) nel 2017. I progettisti Peter Pichler e Pavlov Mikolajkac hanno collaborato con l'azienda LignoAlp del gruppo Damiani Holz per lo sviluppo e la produzione dei componenti strutturali in legno dell'edificio. Nella foto sono ritratti più parti prefabbricate pronte per essere trasportate in cantiere alla quota di 2096 m. LignoAlp

zione in funzione della variabilità del progetto. Tale moltitudine è disseminata sul territorio e non è sempre individuabile, ciascuna portatrice di una propria cultura materiale, legata al territorio.

Per contribuire allo sviluppo di un mercato in cui carpenterie di piccole e medie dimensioni distribuite sul territorio sono capaci di dialogare e di riprodurre le peculiarità di un progetto, occorre garantire un costante stato di aggiornamento sulle disponibilità degli strumenti e sulle loro potenzialità.

La tesi individua due principali temi di studio, approfondimento e formazione, il cui obiettivo congiunto è lo sviluppo di consapevolezza nel merito delle potenzialità del concetto di *headmade*:

- automazione consapevole, per un aggiornamento e una tutela della cultura materiale;
- robotica consapevole, per un aggiornamento tecnico e strumentale, al fine di conoscere le proprietà, le potenzialità e i limiti degli strumenti dell'automazione, come i bracci robotici o macchine innovative come la CNC portatile Shaper[43];

12. Interno di una segheria bellunese.



La diffusione della cultura delle costruzioni in legno contribuisce a superare gli ostacoli che impediscono alle imprese di impiegare in maniera appropriata l'automazione e le relative tecnologie.

4.7 Automazione consapevole

Dall'indagine condotta nell'area del Nordest non emerge un senso di sfiducia nell'impiego di tecnologie come macchine CNC o robot, anzi, chi ha già investito in questo settore, dichiara di voler rifare la stessa scelta e si può quindi desumere una certa soddisfazione degli obiettivi posti a monte del primo investimento in automazione. Manca però chiarezza in merito alle potenzialità delle macchine e manca un quadro di riferimento fatto di esempi, di terminologia e di soluzioni progettuali possibili e alternative relazionate agli strumenti dell'automazione.

Le imprese richiedono studio, formazione e approfondimento al fine di comprendere il ruolo dell'automazione affrontando i temi del:

- *rapporto tra quantità e qualità dei prodotti realizzati in carpenteria*. L'automazione è stata storicamente sfruttata per ottimizzare i tempi di produzione e, di conseguenza, ridurre il costo di ogni singolo prezzo e aumentare la quantità di pezzi prodotti. L'automazione, sfruttata nel pieno delle sue potenzialità, progettando i dettagli e programmando le macchine a lavorare in un regime di massima flessibilità, può alzare la qualità della produzione e consentire alle carpenterie di sviluppare filiere di produzione che sviluppano lavorazioni *on-demand* a partire da prodotti standard (customizzazione) o sviluppando interamente elementi, giunti, nodi e parti del progetto d'architettura per la realizzazione dei quali l'impegno lavorativo della macchina non cresce quanto l'impegno progettuale, che cresce e diviene misura del valore del prodotto (*headmade*).
- *del progetto e della produzione del materiale legno*. L'ottimizzazione dei processi di lavorazione, soprattutto nel caso di un materiale naturale come il legno, consente di individuare specifiche caratteristiche tecniche volte al raggiungimento di un particolare obiettivo. L'automazione può contri-



13. Deposito di una segheria in Cadore.

buire a organizzare in modo differente i tempi delle varie fasi che compongono il processo di trasformazione della materia prima da albero a parte di un'architettura. La riduzione dei tempi di lavorazione della materia possono tradursi in un risparmio in termini di costi ma, ancor più rilevante, consentono di dare più valore al progetto della materia legno non solo al fine di sviluppare nuove forme e tipologie di prodotti, ma anche al fine di riscoprire o rivalutare alcune fasi del processo di lavorazione che hanno storicamente determinato al qualità delle carpenterie lignee. La ricerca del materiale e la sua valutazione qualitativa (anche in relazione alle sempre più chiare esigenze di sostenibilità ambientale), l'essicazione tramite procedimenti naturali, l'ambientazione dei prodotti lignei in opera, sono fasi del processo di progettazione e di produzione spesso messe in



secondo piano e non pianificate ma che possono influire profondamente sulla qualità delle strutture lignee soprattutto al passare del tempo.

I temi descritti sono tra loro in stretta relazione e tale relazione aumenta di rilevanza qualora gli attori della filiera legno e gli utenti delle costruzioni in legno saranno in grado di comprendere che costruire in legno non equivale solo a realizzare abitazioni in tempi rapidi, affidandosi a schemi strutturali e dimensionali standard, riferendo a pratiche costruttive mutuate da tradizioni costruttive esterne alla filiera del legno. Accrescere il valore del progetto del dettaglio e degli elementi da porre in opera, aumentare la versatilità degli strumenti dell'automazione, investire nella formazione professionale e nell'acquisto o nell'aggiornamento delle macchine sono passi di un cammino che non può avvenire senza una più alta considerazione della materia prima legno e un miglioramento della qualità dei prodotti a base legno. Così progredendo, il futuro progetto dell'architettura in legno non potrà prescindere da un innalzamento generale della consapevolezza e della competenza nella valutazione della qualità dell'insieme del progetto, considerato nel suo ciclo di vita.

Ad oggi è significativo, per il successo dell'integrazione tra automazione e carpenterie, lavorare sulle modalità con cui le attività di studio, approfondimento e formazione vengono strutturate. In particolare è necessario che esse abbiano un pubblico eterogeneo. In questo modo il tema dell'architettura in legno e, in particolare, delle carpenterie lignee strutturali verrà affrontato in forma multidiscplinare, mettendo a sistema criticità e potenzialità di differenti settori, con l'obiettivo di costruire strategie comuni, recuperando saperi antichi e confrontandoli con nuove proposte progettuali e sperimentali sviluppi di materiali e di software. Da un simile dibattito e incontro di ragioni sarà possibile lo sviluppo di un progetto d'architettura e di un progetto di produzione più complesso, ragionato e ragionevole, per prodotti più *headmade*.

4.8 Robotica consapevole

Ciascuna impresa ha un processo produttivo differente, caratterizzato da fattori materiali come il numero dipendenti, gli orari di lavoro, la tipologia di attività, ecc. e da fattori immateriali come il *know how*, la rete di relazioni, clienti e fornitori, la predisposizione all'innovazione o all'accettazione del rischio, ecc. Ogni caratteristica propria di un'impresa definisce le carpenterie come piccoli ecosistemi all'interno dei quali gli strumenti dell'automazione hanno ruoli e mansioni caratterizzanti e caratterizzati al pari degli altri aspetti descrittivi dell'unicità di ogni impresa.

Le richieste strumentali che ogni azienda può e deve porre sono estremamente variabili e lo strumento automatico, il robot, deve essere adattabile a differenti attività o lavorazioni. Se un investimento in aggiornamento tecnologico (macchine o software) può essere un importante volano di qualità per un'azienda, è altresì vero che solo una scelta opportuna dello strumento può considerarsi effettivamente vantaggiosa. Se la scelta non viene ponderata, il rischio è quello di investire in tecnologie sfruttabili solo parzialmente o addirittura totalmente non utilizzabili. L'aggiornamento strumentale perciò non consiste solamente nell'acquistare macchinari o software di ultima generazione, ma richiede prima di tutto un'attenta analisi delle esigenze dell'azienda e delle prospettive di futuro

prossimo impiego, è altrettanto importante anche la conoscenza del parco macchine disponibile. La ricerca ha evidenziato una certa distanza tra i macchinari disponibili oggi sul mercato e le tipologie di macchine potenzialmente adatte al settore manifatturiero in esame, nel caso specifico delle carpenterie del Nordest. Molti macchinari sono di grandi dimensioni, volti a compiere più lavorazioni seguendo lo schema di una filiera di linea, volti ad innalzare la produttività e adatti alle aziende che dispongono di capacità di investimento maggiori rispetto a quanto possa fare un piccolo produttore. I modelli di macchina richiesti dalle manifatturiere della carpenteria lignea hanno dimensioni più contenute, si adeguano agli spazi ridotti delle micro e piccole imprese diffuse sul territorio e hanno un grado di flessibilità molto ampio in virtù del quale possono eseguire svariate operazioni a seconda di come vengono programmati. Per questa ragione, il braccio robotico rappresenta idealmente lo strumento più appropriato per la tipologia di manifattura analizzata in questa tesi: esso infatti può avere dimensioni variabili, essere fisso o mobile e sfruttare differenti utensili a seconda della lavorazione da eseguire.

Per attuare un cambiamento dal punto di vista strumentale occorre interpretare i bisogni di un'azienda in termini di produzione e di prospettive di mercato e, in funzione di questi, progettare lo strumento più adatto. Investire in uno strumento flessibile può rappresentare un vantaggio perché si può adattare alle differenti esigenze dell'azienda e del mercato, ma anche del singolo progetto architettonico che, per sue peculiarità, può richiedere lavorazioni *ad hoc*.

Sebbene l'Italia in termini di aggiornamento tecnologico sia uno dei paesi più arretrati del contesto europeo, è anche il territorio in cui si concentrano alcuni tra i più grandi produttori di macchine e robot per l'automazione (ENEA, 2014), legati in primo luogo al settore automobilistico che storicamente costituisce uno dei comparti produttivi più innovativi. Parallelamente si sono sviluppate figure professionali capaci di fare da intermediario tra il settore produttivo con quello delle tecnologie avanzate, offrendo servizi di consulenza: attualmente questa professione non è molto diffusa ma è destinata a svilupparsi vista la crescente richiesta da parte delle aziende di consulenze finalizzate all'acquisto di macchinari e software, come emerso dal questionario. Si tratta di consulenze esterne alle aziende produttrici di macchinari e vengono svolte da figure professionali che traducono le esigenze e le soluzioni della produzione e della ricerca: i centri di ricerca, di sperimentazione e di prototipazione costituiscono il luogo ideale in cui professionisti afferenti a settori differenti possono conoscere le tecnologie sul mercato, confrontarsi direttamente con la pratica dei software e delle macchine, studiare la fattibilità e l'integrazione di nuovi strumenti nella propria linea di produzione. Progettare ed offrire questo tipo di formazione mirata, attraverso esperti del settore, è premiante ora e lo sarà nel prossimo futuro.

4.9 La carpenteria diffusa

La trasformazione del settore manifatturiero della carpenteria lignea, se basata su opportune attività di formazione e di aggiornamento strumentale, potrà contribuire allo sviluppo delle imprese senza che esse si allontanino dalla cultura materiale tipica del loro territorio di riferimento. Le nuove tecnologie permetteranno di intervenire in maniera mirata e flessibile, adeguando la produzione alle nuove sopraggiunte necessità: lo stesso robot impiegato per modellare giunti

strutturali potrà essere programmato per lavorare la montatura di un occhiale o per produrre complementi d'arredo. In questo modo le carpenterie e il loro insieme, rappresentato dai distretti produttivi, potranno essere detti flessibili e, per quanto caratterizzati da un'attività primaria, saranno capaci di rispondere anche alle richieste di settori merceologici differenti e distanti da quelli di vocazione primaria. In uno scenario simile, l'impiego dell'automazione potrà contribuire ad espandere in maniera significativa le potenzialità di ciascuna piccola impresa senza che questa vincolata ad una crescita in termini di numeri di prodotti, ma garantendo che essa possa rispondere più puntualmente alle differenti e complesse richieste di mercato, in virtù di un maggiore *headmade*.

Si realizza così lo scenario di "carpenteria diffusa" in cui le lavorazioni possono essere eseguite da una rete di imprese distribuite in maniera capillare sul territorio e tra loro legate dall'attività di progettazione e da una cultura tecnica che possono essere condivise attraverso gli strumenti e le possibilità di espressione di cui l'automazione consapevole si fa garante. In questo modo, la competenza e la cultura materiale proprie di artigiani e carpentieri possono essere messe a sistema e a disposizione del progetto d'architettura. Questo modello di manifattura si adatta all'attuale contesto del Nordest caratterizzato dalla presenza di piccole e micro imprese, favorendo il confronto diretto con progettisti e clienti, ma soprattutto preservando le peculiarità che caratterizzano il territorio, siano esse di natura culturale e tecnica (come possono essere le specifiche lavorazioni, le tecniche di taglio, ecc.) o di natura paesaggistica (come possono essere la cura e la coltivazione delle foreste).

Il modello della carpenteria diffusa contribuisce allo sviluppo di una progettazione architettonica più flessibile e adatta alle tendenze del mercato delle costruzioni in Italia (e non solo). Il mercato edilizio è sempre più caratterizzato da attività di ristrutturazione e sempre meno da nuove costruzioni: nel 2016 sono stati spesi 110,5 miliardi di euro in ristrutturazioni, e 29 miliardi di euro nella realizzazione di nuovi edifici; il 74,3% degli investimenti in ristrutturazioni è stato dedicato ad attività di manutenzione straordinaria, mentre il 36,2% in manutenzione ordinaria (CRESME e Fondazione Symbola, 2017). Questa tipologia di attività richiede un progetto, e quindi una produzione, eseguita *ad hoc* perché svolta in stretta relazione con il manufatto su cui si va a intervenire. Nel caso specifico della carpenteria lignea, l'intervento di manutenzione è fondamentale perché insito nella natura stessa della materia che presenta naturali limiti di durata[44].

Il modello della carpenteria diffusa basa il proprio potenziale sull'impiego dell'automazione e permette attraverso di essa, di potenziare una rete capillare di carpenterie già esistente sul territorio del Nordest. La digitalizzazione permette di condividere saperi e dati, trasferire "gesti produttivi" in luoghi differenti e con esse anche tecnologie per la carpenteria lignea edilizia attraverso lo sviluppo di nuovi modelli di costruzione e assemblaggio, o il recupero e la trasformazione di tecniche storiche.

Note

1 La presente tesi considera Nordest l'area geografica compresa nelle regioni di Friuli Venezia Giulia, Trentino Alto Adige e Veneto, a differenza della classificazione ISTAT, che include anche l'area dell'Emilia Romagna.

2 Il settore non-residenziale include anche la realizzazione delle strutture per l'Expo 2015 Milano, in cui molti padiglioni sono stati realizzati con elementi in legno.

3 Solo con la legge 1086/1981, l'acciaio fu riconosciuto legislativamente come materiale da costruzione: fino agli anni Settanta questo materiale infatti non fu utilizzato in Italia.

4 Il sistema baraccato consiste in un telaio in legno e con tamponamenti in muratura: questo sistema è stato impiegato soprattutto nelle zone del Mediterraneo, anche in Sicilia e Calabria, zone soggette ad eventi sismici. Richiama la "gaiola palombina" portoghese, utilizzata dopo il terremoto del 1755 di Lisbona.

5 La prima normativa sul legno risale al 1909, emanata in seguito al terremoto che colpì Messina il 28 dicembre 1908. Si tratta del Regio Decreto del 18 aprile 1909 n.193 "Portante norme tecniche ed igieniche obbligatorie per le riparazioni ricostruzioni e nuove costruzioni degli edifici pubblici e privati nei luoghi colpiti dal terremo del 28 dicembre 1908 e da altri precedenti elencati nel R.D. 15 aprile 1909 e ne designa i Comuni", a cui all'art. 13 si fa riferimento all'impiego dei sistemi baraccati, ovvero telai in legno (in nota precedente). Nella Legge del 26 novembre 1962 n. 1684 "Provvedimenti per l'edilizia, con particolari prescrizioni per le zone sismiche", a cui all'art. 14 si riportano alcune indicazioni sull'impiego del legno in edilizia, sebbene l'art. 9 limita le costruzioni in legno "soltanto in via eccezionale previo motivato nulla osta dell'ufficio del genio civile". Nella Legge del 2 febbraio 1974, n. 64 "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche" il legno viene segnalato tra i possibili sistemi da utilizzare, così come nel recente D.M. 16 gennaio 1996 (Norme Tecniche per le Costruzioni in zona sismica). A partire dal 2000 è iniziata una revisione normativa sull'impiego del legno in edilizia (Giachino, 2013).

6 Legge n. 1684/1962, art. 9: "Sono ammesse costruzioni in legname soltanto in linea eccezionale previo motivato nulla osta dell'Ufficio del genio civile". Successivamente si indicano i limiti dimensionali per l'impiego di strutture in legno. Legge n. 1086/1971 emana le norme edilizie che non contemplano l'uso del legno: "Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica".

7 Deutsches Institut für Normung (DIN) è l'organizzazione tedesca per la definizione di standard, con mansioni e competenze analoghe all'italiano UNI.

8 L'Eurocodice è una norma volta ad armonizzare le normative in ambito edilizio all'interno dell'Unione Europea, con la definizione di parametri standard, ai quali le diverse normative nazionali dovevano rifarsi: gli Eurocodici sono in tutto 9, e il numero 5, emanato nel 1995, è dedicato alle costruzioni in legno: "Progetto di strutture in legno".

9 In altre zone europee, come in Austria, il governo ha agevolato l'intera filiera produttiva del legno, permettendo così lo sviluppo e l'innovazione anche nel settore della carpenteria lignea.

10 L'Austria è il maggior produttore di legno lamellare d'Europa: nel 2014 ha prodotto 1,5 milioni di mc, di cui un terzo è stato esportato all'estero (Plackner, 2015).

11 Sul mercato si inseriscono prodotti con materiali isolanti, tipo Lignatur, un pannello prefabbricato per partizioni orizzontali con predisposizione interna di materiale isolante a base di fibra di legno.

12 Il maggiore produttore di pannelli X-Lam in Italia è X-Lam Dolomiti (UNECE 2017).

13 Per approfondire si veda paragrafo 3.7 Sostenibilità, durevolezza e durabilità.

14 Il settore riguarda la carpenteria e la falegnameria, quindi non solamente il legno per la realizzazione di componenti edili, ma anche mobili e prodotti di altro genere.

15 CNR IVALSA è parte Consiglio Nazionale delle Ricerche: Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree. L'Istituto è ripartito nelle sedi di Firenze, Trento, Grosseto e Catania. Le attività di ricerca riguardano principalmente i seguenti ambiti: edilizia in legno, processi industriali del legno, tecnologia del legno, patrimonio culturale ligneo, gestione sostenibile dell'ecosistema terreste, tutela e valorizzazione della biodiversità forestale e del patrimonio agro-forestale, caratterizzazione, selezione e propagazione delle specie arboree, sfruttamento sostenibile e meccanizzazione della raccolta della biomassa, dendrocronologia, supporto alle imprese, formazione e servizio di documentazione.

16 FederlegnoArredo è la Federazione italiana delle industrie del legno, del sughero, del mobile, dell'illuminazione e dell'arredamento, nata nel 1945. La federazione raccoglie numerose aziende dei comparti della carpenteria e della falegnameria, al fine di tutelare il settore commerciale e promuovere l'innovazione tecnologica all'interno delle aziende socie. La Federazione si suddivide in differenti associazioni a seconda dei prodotti, suddivise in due macro categorie, Assarredo (Assobagno, Assoluce, Asal Assoallestimenti, Assufficio) e Assolegno (Assoimballagi, Edilegnoarredo, Assopannelli, Fedecomlegno, Assocofani, Assotende). Il centro studi ricerche di FederlegnoArredo effettua ogni anno indagini di mercato per monitorare il mercato e fornire utili indicazioni sul suo andamento alle società affiliate.

17 Associazione della FederlegnoArredo. Assolegno è associazione di riferimento per le società della filiera del legno che operano nel settore edile. Effettua ricerche di settore tramite il centro studi

ricerche di FederlegnoArredo, su scala nazionale, sul fatturato del settore, sulle importazioni e sulle esportazioni di legname, sulla tipologia di prodotti in legno realizzati.

18 PromoLegno è un'iniziativa di ProHolz Austria, che promuove attività di formazione nel territorio in Trentino Alto-Adige. La sede è a Bolzano ma coinvolge tutto il territorio delle province autonome di Bolzano e Trento, e delle limitrofe città di Belluno e Vicenza. L'attività di formazione si struttura in convegni, workshop e materiale disponibile online in merito all'impiego del legno in edilizia.

19 Alcuni consorzi sono ad esempio Consorzio Legno Veneto, Legno Trentino, Filiera Legno FVG (Friuli Venezia Giulia), che sono consorzi volti a tutelare le realtà locali della filiera del legno. Obiettivo dei consorzi è mettere in contatto le aziende delle stessa filiera.

20 Nel 2014 i permessi di costruire per strutture in legno corrispondono al 6,4%, mentre nel 2015 al 7,2%.

21 Fonte: Elaborazione Centro Studi Federlegno Arredo Eventi Spa su Dati ISTAT (2° Rapporto Case ed edifici in legno, 2017, p. 21)

22 La segheria alla veneziana insieme a quella tedesca, sono le tipologie di segherie diffuse nell'arco delle Dolomiti: si distinguono per la dimensione della ruota del mulino, la prima più piccola, la seconda più grande. Spesso le segherie disponevano di entrambe per ottenere velocità differenti a seconda della lavorazione da eseguire (Barbisan, 2017, p. 65).

23 "Dalla decina di segherie presenti sul finire del Quattrocento nel solo Cadore, si passa ad una cinquantina fra Cinque e Seicento, per diventare un centinaio nel secolo successivo, e circa duecentocinquanta nell'Ottocento" (Barbisan, 2008, p. 67).

24 In Alto Adige la cultura delle costruzioni in legno è restata attiva grazie alla geografia del luogo, caratterizzata dalla presenza di legname, ed è stata influenza anche della vicina Austria, leader internazionale nella produzione di legname per l'edilizia. Sono proprio in queste due delle più importanti aziende del settore della carpenteria lignea in Italia (e in Europa): Rubner Spa a Chienes, nata nel 1926, e Damiani Holz a Bressanone, nata nel 1927.

25 Anno in cui Leonardo Del Vecchio fondò ad Agordo (BL) un'azienda di occhiali oggi leader mondiale del settore, Luxottica.

26 Il tessuto delle PMI e delle micro imprese è molto fitto in Italia: le Micro e le Piccole Imprese con meno di 50 addetti costituiscono infatti il l'asse principale del sistema economico e rappresentano nella categoria delle imprese fino a 250 addetti, l'83,9%. L'Italia è il secondo paese europeo per numero di addetti nelle PMI (2,8 milioni di addetti), dopo la Germania (3,3 milioni di addetti) (Confartigianato, 2017). Nel contesto manifatturiero italiano si distinguono per numero di addetti alle PMI la Provincia Autonoma di Bolzano (67,2%), il Veneto (64,2%), la Lombardia (62,7%), le Marche (60,9%) e seguono tutte con un peso del 60,3% l'Emilia-Romagna, la Provincia Autonoma di Trento e la Valle d'Aosta (Confartigianato, 2017, p. 10)

27 Per approfondire si veda paragrafo 3.8 Prospettive di sviluppo.

28 Registro delle Imprese è il registro a cui sono registrate tutte le imprese del territorio: è considerato come l'anagrafe delle imprese. Il registro è costantemente aggiornato attraverso le singole Camere di Commercio del territorio: il registro contiene differenti informazioni (stato giuridico, dati di recapito, tipologia di azienda e trasformazioni societarie) e può fornire un quadro completo sulle imprese, soprattutto dal punto di vista giuridico, quindi se l'impresa è attiva o cessata ad esempio. Il Registro costituisce un sistema attraverso il quale monitorare lo stato delle imprese e quindi lo sviluppo economico delle singole aree, ma anche più in generale del territorio italiano.

29 Sono incluse a questa voce di classe merceologica: taglio, piallatura e lavorazione meccanica del legno; taglio e scortecciatura dei tronchi; fabbricazione di traversine di legno per strade ferrate; fabbricazione di rivestimenti per pavimenti in legno non assemblato; fabbricazione di lana di legno, farina di legno, trucioli, segatura; essiccazione, stagionatura del legno; impregnazione e trattamento chimico del legno con materiali adatti alla sua conservazione Dalla classe 16.10 sono escluse: taglio e produzione di legno grezzo, cfr. 02.20; fabbricazione di fogli sottili da impiallacciatura per essere utilizzati nella produzione di compensato, tavole e pannelli, cfr. 16.21; fabbricazione di asticelle, bacchette e modanature, cfr. 16.23; fabbricazione di ciocchi preparati per il fuoco e pellets, in legno pressato, cfr. 16.29.

30 Sono incluse a questa voce di classe merceologica: fabbricazione di prodotti in legno destinati principalmente all'edilizia: travi, travicelli, puntoni eccetera; fabbricazione di capriate in legno prefabbricate, laminate e connesse con parti metalliche; fabbricazione di scale, ringhiere, asticelle, bacchette, modanature, aste da corniciai; fabbricazione di edifici prefabbricati o di loro elementi, prevalentemente in legno, ad esempio saune; fabbricazione di case mobili; fabbricazione di divisori in legno (eccetto i divisori mobili); fabbricazione di scenografie in legno Dalla classe 16.23 sono escluse: fabbricazione di pavimenti di legno: quadroni e strisce per pavimenti a parquet, assemblati in pannelli, cfr. 16.22; fabbricazione di cerniere e serrature in metallo, cfr. 25.72; fabbricazione di mobili da cucina, librerie, armadi eccetera, cfr. 31.01, 31.02, 31.09; fabbricazione di divisori mobili di legno, cfr. 31.01, 31.02, 31.09.

31 Il questionario con il termine "robot" fa riferimento anche ai macchinari a controllo numerico a più assi (CNC).

32 Per approfondire si veda il capitolo tre.

33 Ufficio Studi Confartigianato Imprese. Piccola impresa, tradizione che ha futuro. 12° Rapporto annuale. Assemblea Confartigianato, 20 giugno 2017.

34 Gli enti a cui si fa riferimento sono di natura differente: ArTec - Archivio delle Tecniche e dei materiali per l'architettura e il disegno industriale, Università Iuav di Venezia; Legno Trentino; Consorzio

Legno Veneto; Buildopia; IDM Südtirol, Bolzano. Sono stati contattati altri enti e consorzi territoriali, che purtroppo non hanno risposto o dato disponibilità nella segnalazione di aziende da coinvolgere nell'indagine. Le aziende già afferenti ad associazioni di categoria, consorzi o enti universitari, fa presupporre un grado di disponibilità nella partecipazione ad attività di ricerca simili a quella condotta, per questo motivo sono state considerate anche questo tipo di segnalazioni.

35 Il questionario è stato redatto con il supporto di ricercatori operanti nell'ambito della psicologia del lavoro.

36 In riferimento a Survey Monkey, piattaforma digitale per sviluppo e assistenza modelli d'indagine, raccolta ed elaborazione dati.

37 La macchina CNC e i pantografi sono gli strumenti più diffusi nelle falegnamerie e nelle carpenterie. Per approfondire si veda paragrafo 3.5 Gli strumenti per la lavorazione del legno.

38 Alcuni software sono Sema, Dietrich's, Artlantis, Graphisoft, altri invece sono specializzati sulle tipologie di elementi da impiegare Hsb Timber, Hsb panel, altri invece sono realizzati direttamente dall'azienda produttrice come Wolf's System.

39 Durante la visita a XYLexpo (Milano, maggio 2018), la più importante fiera internazionale nel settore dei macchinari per la lavorazione del legno, i bracci robotici esposti venivano impiegati per le operazioni di verniciatura, quindi per operazioni ripetitive, non vi erano invece applicazioni per la lavorazione della materia. Molti produttori di macchinari hanno dichiarato che non è più necessario distinguere una macchina CNC da un braccio robotico, poiché possono eseguire lavorazioni molto simili.

40 Sono state indicate da terzi, ma non hanno partecipato al sondaggio.

41 Come ad esempio la produzione di chiodi, la cui standardizzazione e produzione meccanica ha permesso di realizzare grandi quantitativi di connettori di identica manifattura.

42 Per approfondire si veda capitolo uno.

43 Per approfondire si veda paragrafo 3.5 Gli strumenti per la lavorazione del legno.

45 La storia delle costruzioni in legno mostra che per garantire la durabilità di una struttura è necessario progettare l'interscambiabilità delle parti che la compongono, e quindi la possibilità di intervenire puntualmente per sostituire parti specifiche di un manufatto.

Conclusioni

Dal 14 gennaio 2008, data dell'emanazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni, in Italia si registra un incremento del numero delle costruzioni in legno, soprattutto per la realizzazione di edifici ad uso residenziale oltre che per l'edificazione di coperture (Federlegno, 2017). Questo mercato ad oggi è fortemente caratterizzato dall'impiego di elementi prefabbricati standardizzati, scelti a catalogo e talvolta privi di una progettazione che integra le esigenze strutturali ai vari quesiti interdisciplinari che identificano ogni singolo progetto. Tale approccio alla costruzione in legno è stato mutuato da limiti culturali e normativi che negli ultimi decenni del Novecento hanno fortemente rallentato lo sviluppo dell'edilizia in legno in Italia. Il ritardo dell'emanazione di normative nazionali dedicate alle costruzioni in legno ha infatti scoraggiato l'impiego di questo materiale nel settore edilizio, mentre in altri paesi europei, come Austria e Svizzera, le normative hanno presto interessato l'intera filiera, dalla silvicoltura allo smaltimento dei rifiuti a base di legno. Allo stesso tempo, la tradizione costruttiva italiana alimentata e definita dalle politiche della ricostruzione postbellica ha rallentato l'ingresso sul mercato di prodotti in legno, soprattutto se dedicati alla realizzazione delle strutture portanti e ne ha orientato l'impiego a coperture o a sistemi di rivestimento.

L'Italia dunque oggi si trova svantaggiata rispetto a Paesi che hanno fatto della filiera del legno un tema della propria economia e che hanno investito in ricerca, sviluppando proposte e soluzioni progettuali innovative, grazie anche all'impegno diretto delle imprese del settore[1]. Nonostante questo rallentamento, il *know how* e il retaggio storico in merito alla coltivazione, al taglio e alla lavorazione del legno è rimasto vivo nel tessuto produttivo italiano, caratterizzato da tante piccole realtà industriali o artigiane, eterogenee e diffuse su tutto il territorio nazionale. Esse costituiscono una rete di conoscenza del legno, delle foreste, della carpenteria, ma anche della sua messa in opera e soprattutto della sua manutenzione: la tesi ha raccolto e riporta alcuni elementi di questo vasto *know how* che costituisce un vero e proprio patrimonio tecnico e culturale da preservare e che, grazie all'innovazione, può ridare slancio a un'economia locale che a volte, al confronto con l'automazione, appare timorosa.

Oggi l'interesse dei progettisti, dei committenti e dell'industria nei confronti delle costruzioni in legno è crescente, gli investimenti in questo settore sono in

rialzo anche in Italia, in controtendenza con il mercato edilizio generale (FederlegnoArredo 2017). Non ultima tra le ragioni di tale interesse, vi è la naturale predisposizione del materiale legno a farsi tramite di idee e valori legati all'ambito della sostenibilità ambientale.

Indagando le ragioni del successo del legno strutturale in edilizia va riconosciuto che la sua ampia diffusione è stata possibile grazie all'impiego di legno ingegnerizzato e di prodotti prefabbricati a base di legno, che hanno contribuito a velocizzare i tempi di lavorazione e messa in opera. Questa ottimizzazione si è tradotta in una riduzione del margine di rischio e dei tempi di realizzazione del manufatto, fattori che possono essere determinanti nella scelta della tecnologia da impiegare per realizzare un edificio ma che, allo stesso tempo, hanno richiesto alle aziende del settore un adeguamento alle nuove forme di produzione, non più orientate esclusivamente alla lavorazione del materiale legno tale quale ma anche alla sua innovazione. Il caso italiano, in tale contesto, mostra una produzione affaticata. Le ragioni derivano sia dalla competizione sul mercato, specialmente con prodotti realizzati al di fuori dei confini nazionali, che dal carattere restrittivo della regolamentazione vigente entro i confini nazionali. In questo contesto chi produce elementi lignei ad uso strutturale in Italia non è sempre in grado di rispondere in maniera appropriata alle sfide progettuali più attuali.

Per comprendere questo nuovo interesse verso il legno e per tratteggiare le prospettive dell'impiego di questo materiale in edilizia la tesi ha considerato che la progettazione e la produzione si evolvono e si innovano con un ritmo differente. Il mercato italiano è particolarmente caratterizzato dalla produzione di pannelli portanti X-Lam (Federlegno, 2017), destinati a costruzioni residenziali: si tratta di prodotti le cui dimensioni e tipologie di collegamento sono spesso standardizzate e incidono quindi sulla definizione strutturale di un edificio. Al contrario, le sperimentazioni progettuali, stanno portando alla luce una serie di nuovi possibili paradigmi strutturali per il legno impiegato in architettura e al contempo stanno consentendo di riscoprire e di reinterpretare alcune soluzioni di giunto e alcuni usi delle specie lignee appartenenti a tradizioni costruttive distanti sia geograficamente che temporaneamente. La tesi raccoglie queste sperimentazioni progettuali, ne riassume le principali caratteristiche e giunge alla conclusione che anche grazie al supporto degli strumenti dell'automazione, quali macchine a controllo numerico CNC e bracci robotici, la tradizione del territorio non costituisce più un riferimento imprescindibile per ogni nuova realizzazione; essa può essere rielaborata attraverso lo sviluppo di nuove soluzioni formali e a ibridata con culture lontane. Fabio Gramazio e Matthias Kohler definiscono tale trasformazione con il concetto di *Digital Materiality* e sottolineano il valore di una materia legata alle leggi della fisica e arricchita da quelle del mondo immateriale della logica digitale (Gramazio e Kohler, 2008, p. 8). La digitalizzazione dell'architettura, in questo modo, consente di sfruttare appieno il valore fisico e concreto della materia legno e contribuisce a riscoprire, rafforzare e riscrive le conformazioni strutturali tradizionali.

Nello scenario appena descritto, la tesi definisce e mette in luce il concetto di *headmade* come frutto di una lavorazione il cui gesto produttivo può essere eseguito da una mano oppure da un robot. Ciò che più incide sul valore finale e che quindi determina anche buona parte della qualità del prodotto, è prima di tutto l'idea elaborata con la testa (*head*) e non necessariamente la lavorazione a mano (*hand*), superando così il termine a cui spesso l'artigianato viene associato,

handmade. La definizione di *headmade* può contribuire a tradurre le trasformazioni tecnologiche del settore in opportunità per l'invenzione di nuove forme e di nuovi processi produttivi, in cui è riconoscibile il valore delle idee che nascono dal confronto tra il saper fare artigianale, il saper progettare e il saper gestire i nuovi ampliati confini fisici dell'automazione, in cui il gesto umano della lavorazione può essere supportato o sostituito dall'impiego di strumenti meccanici e robotici. Un'azienda in grado di dare valore alla produzione *headmade* può innalzare il proprio livello di competitività, sviluppando servizi innovativi e capaci di rispondere alle più moderne esigenze e valorizzando l'idea progettuale e il materiale con cui il progetto è realizzato. Gli strumenti dell'automazione quali software per la gestione dei dati o macchine per la lavorazione materiale come bracci robotici e macchine a controllo numerico (CNC), possono costituire un fattore determinante per il successo di tale percorso. Il braccio robotico ad esempio è uno strumento flessibile e può essere impiegato per differenti tipologie di lavorazioni, sia di manifattura additiva che sottrattiva: uno strumento simile può quindi dare risposta alle differenti esigenze espresse dalle aziende diffuse sul territorio italiano. Tuttavia, il grado di innovazione di un processo produttivo non è dipendente soltanto dall'impiego di strumenti di lavoro tecnologicamente avanzati, ma deriva anche dalla capacità di integrare gli strumenti dell'automazione nel processo produttivo esistente, dalla possibilità di coinvolgere in questa nuova modalità di lavoro i vari soggetti della filiera e dalla capacità di acquisire ed esercitare i saperi della cultura materiale tradizionale.

A partire dal riconoscimento del valore dell'*headmade*, la presente tesi ha analizzato il significato dell'automazione e della robotica all'interno del settore della manifattura edile, con particolare riferimento alla filiera produttiva del legno. Troppo spesso la robotica, principale strumento dell'automazione, viene associata quasi esclusivamente all'impiego di androidi dalle sembianze antropomorfe; ciò è errato e distoglie dallo studio delle differenti tipologie di robot e dagli ambiti in cui questi possono essere impiegati. Esistono infatti robot sociali, progettati per l'interazione con l'uomo, robot di servizio per il supporto nello svolgimento delle attività quotidiane, robot industriali per la produzione di beni commerciali: ciascun tipo di robot ha caratteristiche morfologiche e modalità d'impiego proprie. La confusione in merito agli strumenti dell'automazione non agevola il compito dei produttori di elementi strutturali in legno che, posti al confronto con nuove dinamiche di processo e nuovi competitor sul mercato, rischiano di avere un atteggiamento scettico nei confronti dell'automazione. L'automazione può invece contribuire a definire una nuova forma di produzione attraverso l'impiego della robotica che ibrida la produzione artigianale con quella industriale, ispirandosi a quanto sostenuto da Walter Gropius un secolo fa attraverso l'istituzione del Bauhaus[2] e portando le competenze proprie dell'artigiano a una scala più grande: quella industriale.

Le nuove dinamiche produttive e di progetto si traducono in ciò che il presente studio ha definito come un *trasferimento di flessibilità*[3]: la flessibilità che è sempre stata cercata e progettata come una caratteristica propria dei componenti edili, ora contraddistingue gli strumenti della produzione degli elementi edilizi e si sposta più a monte di questa filiera. Una manifattura flessibile è in grado di rispondere puntualmente a un progetto, impiega le tecniche, gli strumenti e le competenze più appropriate a ogni specifica esigenza dando risalto all'idea e allo sviluppo progettuale, più che al gesto produttivo in sé. La progettazione è quindi il fattore che determina la qualità e la morfologia dei componenti li-

gnei con funzione strutturale che, non più condizionati dai limiti imposti dai prodotti prefabbricati e dalle soluzioni standardizzate, costituiscono una parte fondamentale e caratterizzante il progetto stesso. Le produzioni che sfruttano l'automazione sono caratterizzate da un'alta flessibilità e questa non è necessariamente vincolata all'esigenza di realizzare un alto numero di pezzi: i prodotti *headmade* sono sviluppati in base a obiettivi qualitativi, più che quantitativi. Una grande attenzione nel momento della progettazione trova quindi una corrispondenza nella dettagliata produzione dei giunti e nella modellazione degli elementi strutturali: il progetto e la produzione *headmade* possono conferire alle strutture in legno dimensioni e forme strutturali innovative, tagliate sulle specifiche richieste del progettista.

L'automazione può contribuire a riavvicinare la progettazione alla produzione attraverso il recupero della cultura materiale, tipica delle carpenterie tradizionali e che è andata scemando con l'avvento dell'industrializzazione e della conseguente produzione in serie. Il Tamedia Centre a Losanna, progettato da Shigeru Ban e prodotto dalla carpenteria Blumer-Lehmann, testimonia il riavvicinamento della progettazione al processo produttivo, mediato da una profonda conoscenza della materia legno. Shigeru Ban sfrutta le proprietà delle differenti specie di legno e recupera tipologie di collegamenti legno-legno tradizionali, trasponendo a scala architettonica delle conoscenze della falegnameria per arredi; Blumer-Lehmann aggiorna la propria linea di produzione sfruttando il potenziale delle nuove tecnologie al fine di tradurre la propria competenza artigianale in un processo industriale automatizzato fondato sull'interazione con la materia. Il dialogo tra progetto e produzione definisce l'approccio *headmade*; in contesti caratterizzati da una lunga tradizione di carpenterie e falegnamerie, questo può determinare la fortuna o il rilancio delle attività, arricchite dagli strumenti ma soprattutto sostenute da un approccio progettuale dalla forte spinta innovativa. In questo scenario la cultura materiale della tradizione territoriale, stimolata da un aggiornamento delle tecniche e dallo sviluppo di nuove forme di produzione, intelligenti, flessibili, su misura, supporta la produzione *headmade*.

La tesi indaga il settore dell'architettura in legno a livello italiano e sviluppa un focus sull'area geografica del Nordest, caratterizzata dalla concentrazione di aziende del settore e dal crescente impiego di legno strutturale in edilizia. È stata condotta un'indagine per esaminare la complessità di questo territorio e per conoscere il legame tra il settore manifatturiero e l'automazione, determinante per lo sviluppo del valore di *headmade*. Ciò non significa attribuire all'automazione il ruolo di soluzione per tutte le problematiche produttive ed economiche di una regione; la tesi afferma che, con una corretta visione strategica e individuando l'ambito di applicazione più appropriato, l'automazione può essere uno strumento utile per la ripresa produttiva ed economica di una filiera oggi in difficoltà.

L'indagine è stata condotta sul territorio del Nordest, le cui aziende sono strettamente legate alle condizioni del luogo: dal caso del Cadore in cui le segherie e le carpenterie sono state dismesse a partire dall'Ottocento, a quello dell'Alto Adige in cui il settore del legno è cresciuto e il mercato edilizio è fortemente caratterizzato dalla produzione di sistemi costruttivi prefabbricati. Lo scenario delineato dall'indagine condotta è molto vario ed emergono da un lato la fiducia nei confronti degli strumenti dell'automazione, quali la robotica, dall'altro un mancato interesse nei confronti dell'aggiornamento formativo, soprattutto quando questo è rivolto a coloro che hanno un ruolo attivo nelle aziende di questa filiera.

Criticità e futuri ambiti d'indagine sono stati enfatizzati dal dialogo con le aziende, chiamate a riconoscere le modalità con cui l'automazione può essere impiegata al fine di rispondere in maniera appropriata al progetto *headmade*. La tesi infatti evidenzia le potenzialità di sviluppo e innovazione del settore della carpenteria lignea nel Nordest, caratterizzato da un tessuto di Piccole e Micro Imprese diffuse e radicate sul territorio.

A partire dalla condizione di queste realtà produttive e dal potenziale offerto dall'automazione, la tesi individua la necessità di sviluppare strumenti rivolti alla costruzione di un cambiamento quanto più consapevole. Tali strumenti si identificano in programmi di formazione in due specifici ambiti e denominati *Automazione consapevole* e *Robotica consapevole*. Il primo ambito promuove l'impiego dell'automazione nei processi produttivi, tema che la tesi ha esplicitato attraverso una descrizione ampia del quadro generale riguardante l'automazione, i robot e le innovazioni che legano ciò all'architettura[4] e attraverso la messa a punto di un glossario dei termini più utilizzati, anche se poco condivisi nel momento di confronto tra i professionisti coinvolti per la realizzazione di un progetto. Il secondo ambito mira a promuovere la conoscenza tecnica degli strumenti e degli utensili più innovativi per favorirne un uso appropriato e proficuo: tale proposta è volta a colmare un'esplicita criticità emersa nella descrizione del rapporto tra automazione e produzione[5].

Immaginare lo sviluppo di questo tipo di programmi significa investire nella ricerca e sottolinea l'esigenza di approfondire e di sciogliere le criticità che questa tesi evidenzia. Allo stesso tempo la formazione e la diffusione dell'informazione supportano lo sviluppo del modello di *carpenteria diffusa*, volto a rafforzare una rete di imprese distribuite in maniera capillare sul territorio, capaci di condividere l'attività di progettazione e la cultura materiale attraverso gli strumenti dell'automazione. Tale trasformazione incrementa la capacità delle aziende di rispondere alle esigenze dell'architettura, sempre più rivolta alla flessibilità e orientate ad approfondire le tematiche della sostenibilità, soprattutto nello sfruttamento di una risorsa primaria come il legno. Questa forma di progettazione, alimenta e definisce il valore di *headmade*: l'architetto si pone come interlocutore privilegiato per veicolare l'automazione e la robotica nel settore della carpenteria lignea.

Note

1 Si veda paragrafo 3.8 Prospettive di sviluppo.

2 In riferimento all'opuscolo Bauhaus Dessau del 1927, riportato nella pubblicazione di Vingler H.M. "Il bauhaus. Weimar, Dessau, Berlino 1919-33" (1985). Per approfondire si veda paragrafo 2.1 L'industrializzazione e la prefabbricazione.

3 Si veda il paragrafo 2.7 Il progetto della flessibilità standardizzata.

4 Si vedano i capitoli uno "L'automazione e i robot" e due "L'automazione e l'architettura".

5 Si veda il capitolo tre "L'automazione nella carpenteria lignea".

Bibliografia

La tesi indaga gli ambiti dell'automazione e dell'architettura in legno, con l'obiettivo di individuare le potenzialità, i limiti e la loro interazione. Indagare tali ambiti significa anche capire come la loro evoluzione venga percepita dalla società, e quindi la fiducia o la preoccupazione che in essa le persone ripongono. Le fonti a cui la tesi attinge sono differenti, sia nella tipologia di documenti utilizzati, che nella varietà dei temi scelti. La maggior parte dei documenti è di carattere testuale e spazia da articoli scientifici, atti di convegno, saggi, monografie, fino a quotidiani e romanzi fantascientifici; altri documenti invece sono video consultabili su internet: in questo caso si tratta di lezioni frontali, interventi a convegni, riprese di fasi di lavorazione e di cantiere degli casi studio esaminati.

Per indagare l'interazione tra automazione e architettura in legno, la ricerca è stata condotta in differenti ambiti e la bibliografia seguente è strutturata secondo quelli principali: le forme dell'automazione, la trasformazione della manifattura, l'industrializzazione edilizia, l'architettura attraverso le nuove forme di produzione, l'architettura in legno e gli sviluppi della carpenteria lignea in edilizia. Il tema della robotica rappresenta il denominatore comune ed è presente in ciascuno degli ambiti d'indagine proposti: essa costituisce infatti lo strumento attraverso il quale applicare l'automazione, sviluppare nuove forme di produzione e contribuire a definire nuovi paradigmi dell'architettura.

Le forme dell'automazione

Le fonti riportate delineano le principali finalità e i campi d'impiego dell'automazione e afferiscono ad ambiti disciplinari differenti tra loro, tra cui ingegneria informatica, sociologia, economia aziendale. L'obiettivo è quello di individuare una terminologia specifica di riferimento per lo sviluppo della tesi, utile anche per una corretta comunicazione con le imprese del settore e gli enti di ricerca. L'eterogeneità delle fonti, che spaziano dagli articoli scientifici alla letteratura di fantascienza, contribuiscono a descrivere l'evoluzione e le forme dell'automazione, quindi gli strumenti, i processi e la percezione di questi da parte della società.

AA. VV., *Dizionario etimologico,* Rusconi, Rimini, 2004.

Accetturro Antonio, Giunta Anna, Rossi Salvatore, *Le imprese italiane tra crisi e nuova globalizzazione*, in "Banca d'Italia, Questioni di economia e finanza", n. 86, 2011, pp. 5-26.

Angius Raffaele, *Svelato il segreto dei magazzini Amazon*, AGI Innovazione, 7 marzo 2018. Disponibile su www.agi.it/innovazione/amazon_magazzini_consegne_domicilio-3600677/news/2018-03-07/, presa visione dicembre 2018.

Anzalone Salvatore, *Intelligenze*, in «OFFICINA*», n. 23, 2018, pp. 14-19.

Arup, *It's Alive!*, Arup Foresight, Londra, 2013.

Asimov Isaac, *Io, robot*, Tascabili Bompiani, 1985.

Briant Adam, *G.M. to Close High-Tech Parts Factory*, in «The New York Times», New York, 28 gennaio 1992, p.4.

Calvino Italo, *Le città invisibili*, Einaudi, Torino, 1977.

De Biase Luca, *Homo pluralis. Essere umani nell'era tecnologica*, Codice Edizioni, Torino, 2016.

De Mauro Tullio, *Dizionario Italiano,* Mondadori, Milano, 2004.

Diamond Jared, *Armi acciaio e malattie*, Einaudi, Milano, 2014.

Diderot Denis, *Prospectus (Piano dell'opera)*, in «Dizionario delle arti, scienze e mestieri», Le Breton, 1750.

ENEA, *Robotics in Italy. Education, Research, Innovation and Economics outcomes*, Enea, Roma, 2014.

Engelberger Joseph, et al., *Historical perspective and role in automation*, in "Handbook of industrial robotics", second edition, Wiley&Sons, Hoboken, 1999, pp. 3-10.

Ferrari Francesco, *Robot: da schiavi senz'anima a s-oggetti sociali*, in «OFFICINA*», n.6, Treviso, 2015, pp. 8-13.

Hunt Daniel, *Smart Robots. A handbook of intelligent robotic systems,* Chapman and Hall, New York, 1985.

Isidori Alberto, *Il mondo dei robot: I protagonisti dell'automazione industriale*, Giunti Barbera, Firenze, 1986.

Kessler Sarah, *AMAZON. This company built one of the world's most efficient warehouses by embracing chaos*, 2018. Disponibile su www.classic.qz.com/perfect-company-2/1172282/this-company-built-one-of-the-worlds-most-efficient-warehouses-by-embracing-chaos/, presa visione dicembre 2018.

Lilley Samuel, *Automation and social progress*, Lawrence & Wishart, London, 1957.

Lilley Samuel, *Men, machines and history: a short history of tools and machines in relation to social progress*, Cobbett Press, Cambridge, 1948.

Lombardi Mauro, *Fabbrica 4.0: i processi innovativi nel "multiverso" fisico digitale*, IRPET Istituto Regionale Programmazione economica della Toscana, 2017.

Marchis Vittorio, *Storia delle macchine. Tre millenni di cultura tecnologica*, Laterza, Roma, 1994.

Marsh Peter (traduzione di Martera Brunella), *Fabbricare il futuro - La nuova rivoluzione industriale*, Codice Edizioni, Torino, 2014.

Rociola Arcangelo, *Come si lavora ad Amazon. Una giornata nel centro robotizzato di Passo Corese*, AGI Innovazione, 14 febbario 2018. Disponibile su www.agi.it/economia/amazon_robot_passo_corese-3484320/news/2018-02-14/, presa visione dicembre 2018.

Rovetta Alberto, *Fondamenti di robotica*, Hoepli, Milano, 1990.

Rovetta Alberto, Iannone Vincenzo, *Robots: an evolving species*, in Sorge F., Genchi R.(a cura di) "Essays on History of Mechanical Engineering", Springer, 2016.

Shinom Y. Nof, *Handbook of industrial robotics*, John Wiley & Sons, Canada, 1999 (second edition).

Stanley M. Davis, *From "future perfect": Mass customizing,* in Planning Review, Vol. 17, n. 2, 1989, pp. 16-21.

La trasformazione della produzione

I processi del settore produttivo sono stati ridefiniti prima dalla meccanizzazione e in seguito dall'automazione. Tale trasformazione ha contribuito a rendere sempre più labili i confini tra produzione industriale e produzione artigianale, dando luogo a nuove forme di produzione. Le fonti riportate hanno contribuito a ricostruire tale trasformazione e a delineare la manifattura ibrida, ovvero quella forma di produzione capace di sfruttare e ibridare le potenzialità dei processi industriali con quelli artigianali.

Beltrametti Luca, Guarnacci Nino, Intini Nicola, La Forgia Corrado, *La fabbrica connessa. La manifattura italiana (attra)verso Industria 4.0*, Edizioni Angelo Guerini e Associati, Milano, 2017, p. 216.

Buono Maria, Capece Sonia, Laudante Elena, *Design e artigianato 4.0*, in «MD Journal», "Design e territori", n.5, 2018.

Celaschi Flaviano, Di Lucchio Loredana, Imbesi Lorenzo, *Design e phigital production: progettare nell'era dell'industria 4.0*, in «MD Journal», "Design and industry 4.0 revolution", n.4, 2017.

Cipolla Mario, *Uomini tecniche economie*, Feltrinelli, Milano, 1994.

Confartigianato Imprese Studies Office, *Piccole imprese, la tradizione che ha futuro. 12esimo rapporto annuale (Small business, tradition that has a future. 12th Annual Report)*, Confartigianato Assembly, 2017.

Dal Buono Veronica, Galiotto Raffele, *Post digital Stone Industry*, in «MD Journal», "Design and industry 4.0 revolution", n.4, 2017.

Galloway Daniel F., *Macchine utensili*, in Singer C. et al. (a cura di), "Storia della tecnologia - Vol. 5, L'età dell'acciaio", Bollati Boringhieri, Torino, 2013, pp. 647-668.

Lotti Giuseppe, Trivellin Eleonora, *Design per i nuovi territori*, in «MD Journal», "Design e territori", n.5, 2018.

Micelli Stefano, *Futuro artigiano*, Marsilio, Venezia, 2011.

Micelli Stefano, *Fare è innovare*, Il Mulino, Bologna, 2016.

Picon Antoine, *Il gesto produttivo e l'architettura nel secolo dei Lumi*, in «Casabella», n. 542-543, 1988, pp. 20-23.

Portoghesi Paolo, *Editoriale*, in «Materia», n. 36, Firenze, set-dic 2001, pp.14-19.

Portoghesi Paolo, *Tecnica curiosa: dall'infanzia delle macchine alle macchine inutili*, Medusa, Milano, 2014.

Rosenberg Nathan, *Le vie della tecnologia*, Rosenberg&Sellier, Torino, 1987.

Scodeller Dario, *Cultura industriale e cultura del design*, in «MD Journal», "Design and industry 4.0 revolution", n.4, 2017.

Sennet Richard, *L'uomo flessibile (The corrosion of character)*, Feltrinelli, Milano, 1999.

Sennet Richard, *L'uomo artigiano*, Feltrinelli, Milano, 2008. Sinopoli Nicola, *La tecnologia invisibile*, Franco Angeli, Milano, 1997.

Sheil Bob, *High definition: zero tolerance in design and production*, in «AD Architectural Design Magazine», 2014.

Singer Charles, Holmyard Eric J., Hall Rupert A., Williams Trevor I. (a cura di), *Storia della tecnologia: l'età dell'acciaio, circa 1850-1900*, tomo primo e tomo secondo (titolo originale: *A History of Technology - Volume V: The*

Late Nineteenth Century c. 1850-1900), Bollati Boringhieri Editore, Torino (Oxford University Press, 1958), 2013.

Sironi Marco, *Neo local design,* in «MD Journal», "Design e territori", n.5, 2018.

Smiles Samuel, *Industrial Biography, Iron Workers and Tool Markers, John Murray*, Londra, 1863.

Solís Santos Carlos, *Macchine, tecniche e meccanica*, in "Storia dei Greci e dei Romani", Einaudi, Torino, 1989.

Tamborrini Paolo, Stabellini Barbara, *Metodologie e strumenti per l'innovazione sostenibile*, in MD Journal, "Design e territori", n.5, 2018.

Wilson Charles, *Tecnologia e organizzazione industriale*, in Singer C. et al. (a cura di), "Storia della tecnologia - Vol. 5, L'età dell'acciaio", Bollati Boringhieri, Torino, 1965, pp. 811-826.

Industrializzazione edilizia

La trasformazione del processo produttivo ha contribuito a ridefinire il concetto stesso di industrializzazione edilizia. Per poter comprendere tale evoluzione la ricerca ha fatto riferimento a una serie di fonti strettamente legate a questo ambito, in un arco temporale che spazia dagli anni Sessanta fino agli anni più recenti. In questo caso il riferimento principale si delinea nella figura dell'ing. Thomas Bock, ad oggi considerato il maggiore esperto internazionale nell'impiego della robotica nel settore delle costruzioni, sia in-site che off-site. Le fonti qui riportate contribuiscono a descrivere l'evoluzione dell'industrializzazione edilizia, prima rivolta alla produzione in serie e poi a quella customizzata, o come l'avrebbe definita Giuseppe Ciribini "l'era della super scelte" (1984).

Blachère Gérard, *Industrializzazione dell'edilizia*, Dedalo Libri, Bari, 1965.

Bock Thomas, *Robotic industrialization: automation and robotic technologies for customized component, module, and building prefabrication*, Cambridge University Press, Cambridge, agosto 2015.

Bock Thomas, Linner Thomas, *Site automation: automated/robotic on-site factories*, Vol.3, Cambridge University Press, Cambridge, aprile 2016.

Bock Thomas, Linner Thomas, *Robot-oriented design: design and management tools for the deployment of automation and robotics in construction*, Vol.1, Cambridge University Press, Cambridge, maggio 2015.

Bock Thomas, Linner Thomas, *Construction Robots Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots*, Vol.4, Cambridge University Press, Cambridge, ottobre 2016.

Campioli Andrea, *Enzo Frateili e l'industrializzazione dell'edilizia*, in «AIS/Design Storia e Ricerche», n.9, 2017.

Ciribini Giuseppe, *Architettura e industria: lineamenti di tecnica della produzione edilizia*, Tamburini, Milano, 1958.

Ciribini Giuseppe, *Dal concetto di industria alla produzione industrializzata di beni edilizi*, in AA. VV., "Industrializzazione dell'edilizia", Dedalo Libri, Bari, 1965.

Ciribini Giuseppe, *Prefazione, in Il Componentig - catalogo della mostra organizzata dall'Ente Autonomo per le Fiere di Bologna in collaborazione con l'Associazione*

Italiana Prefabbricazione per l'edilizia industrializzata - AIP - nell'ambito del 4°SAIE - Salone Internazionale dell'Industrializzazione EdiliziaEdizione E.A. Fiere di Bologna, 1968.

Ciribini Giuseppe, *Tecnologia e progetto: argomenti di cultura tecnologica della progettazione*, CELID, Torino, 1984.

De Vita Raffaele, *Esame e classificazione di sistemi di prefabbricazione*, in AA. VV., "Industrializzazione dell'edilizia", Dedalo Libri, Bari, 1965.

Di Biagi Paola (a cura di), *La grande ricostruzione. Il piano INA-Casa e l'Italia degli anni Cinquanta*, Donzelli, Roma, 2001.

Dupire Alain et al. (a cura di Manzini Ezio), *L'architettura e la complessità del costruire: convenzioni, dimensioni e lunguaggi*, Clup, Milano, 1985.

Faccio Franco, Fratelli Enzo, Maggi Pietro N., Turchini Giuseppe, Zaffagnini Mario, *Il Componentig - catalogo della mostra organizzata dall'Ente Autonomo per le Fiere di Bologna in collaborazione con l'Associazione Italiana Prefabbricazione per l'edilizia industrializzata - AIP - nell'ambito del 4°SAIE* - Salone Internazionale dell'Industrializzazione Edilizia, Edizione E.A. Fiere di Bologna, 1968.

Frateili Enzo, *Il rapporto progetto/industria e la terza rivoluzione tecnologica*, in Gangemi V., Ranzo P. (a cura di), "Il governo del progetto", Edizioni Parma, Bologna, 1987, pp.105-110.

Frateili Enzo, *Una autodisciplina per l'architettura*, Dedalo Libri, Bari, 1973.

Frateili Enzo, *Verso una teoria delle connessioni in edilizia*, in «Prefabbricare», n.5, 1967, pp.16-21.

Graf Franz, *Etica della prefabbricazione: arcaismo e universatilità* , in Graf F., Albani F. "Angelo Mangiarotti: la tettonica dell'assemblaggio", Silvana Editoriale, Milano, 2015.

Graf Franz, Albani Francesca (a cura di), *Angelo Mangiarotti: la tettonica dell'assemblaggio*, Silvana Editoriale, Milano, 2015.

Gropius Walter, *Scope of total Architecture*, tr. it. "Architettura integrata", Mondadori, Milano, 1955 (1959).

Herbert Gilbert, *The dream of the factory made house: Walter Gropius and Konrad Wachsmann*, MIT Press, Cambridge, 1984.

Maccolini Mauro, Zaffagnini Mario, *Le tecnologie per la residenza tra evoluzione e involuzione*, in "Cuore Mostra SAIE 1981", pp. 88-89.

Morabito Giovanni, *Forme e tecniche dell'architettura moderna*, Officina, Roma, 1990.

Nardi Guido, *Progettazione architettonica per sistemi e componenti: contributi didattici alla progettazione per l'edilizia industrializzata*, Franco Angeli, Milano, 1976.

Nardi Guido, *Tecnologia dell'architettura e industrializzazione nell'edilizia*, Franco Angeli, Milano, 1980.

Nardi Guido, *Gli orizzonti dell'industria delle costruzioni*, in «L'Arca», n.66, 1992, pp. 90-91.

Nardi Guido, *Le nuove radici antiche*, Franco Angeli, Milano, 1994.

Nardi Guido, *Tecnologie dell'architettura, teorie e storia*, Libreria Clup, Milano, 2001.

Neri Gabriele, *Caricature architettoniche: satira e critica del progetto moderno*, Quodlibet, Macerata, 2015.

Pennacchio Antonio, Ricci Giulia, *Dante Bini. Machatronics,* Postmedia books, Milano, 2016.

Petrignani Achille, *Introduzione*, in AA. VV., "Industrializzazione dell'edilizia", Dedalo Libri, Bari, 1965, pp.11-16.

Vingler Hans Maria, *Il bauhaus. Weimar, Dessau, Berlino 1919-33*, Feltrinelli, Milano, 1987.

Wachsmann Konrad, *Una svolta nelle costruzioni*, Il Saggiatore, Milano, 1960.

Wachsmann Konrad, Walter Gropius and Michael Tower, *The Packaged House System (1941-1952)*, in «Perspecta», Vol. 34, MIT press, 2003, pp. 20-27.

L'architettura e le nuove forme di produzione

Gli strumenti dell'automazione stanno avvicinando sempre più i processi della progettazione con quelli della produzione. Tale evoluzione contribuisce a ridefinire il paradigma progettuale e la tecnologia dell'architettura costituisce la disciplina attraverso la quale leggere e attuare tale trasformazione. Le fonti riportate attingono agli ambiti del design, dell'architettura e della filosofia, con l'obiettivo di indagare all'interno del progetto il valore dell'idea, identificato con il termine headmade.

Anders Günther, *L'uomo è antiquato*, Bollati Boringhieri Editore, Torino, 2015.

AA. VV., *Erweiterung eines Weinguts in Fläsch - Extension of vineyard estate buildings in Fläsch,* in Detail, vol. 47(12), 2007, pp. 1464-1468.

Acocella Alfonso (a cura di), *Paper design*, Altralinea, Firenze, 2014.

Albrecht Benno, *La lunga durata del progetto e la sostenibilità*, in MA Barucco (a cura di), "Durabilità Longue Durée", Aracne, Roma, 2014, pp. 8-27.

Bob Sheil, Achim Menges, Ruairi Glynn and Marilena Skavara, *FABRICATE 2017*, UCL Press, University College London, 2017.

Bologna Alberto, Gargiani Roberto, *The rethoric of Pier Luigi Nervi*, EPFL Press, Losanna, 2015.

Buckminster Fuller Richard, *Education Automation,* Lerici Editore, Roma 1968 (originale Southern Illinois University Press, 1967), 1968.

Campioli Andrea, Lavagna Monica, *Techiche e architettura*, Città Studi, Torino, 2013.

Caneparo Luca, *Fabbricazione digitale dell'architettura: il divenire della cultura tecnologica del progettare e del costruire*, Franco Angeli, Milano, 2012.

Caputi Mario, Odorizzi Paolo, Stefani Massimo, *Il Building Information Modelling BIM: valore, gestione e soluzioni operative*, Maggioli, Rimini, 2015.

Carpo Mario, *The alphabet and the algorithm*, The MIT Press, Cambridge, 2011.

Carpo Mario, *The second digital turn*, The MIT Press, Cambridge, 2014.

Cohen Jean-Louis, *The Future of Architecture. Since 1889*, Phaidon, Londra, 2016.

Faroldi Emilio, Pilar Vettori Maria (a cura di), *Dialoghi di architettura*, Alinea, Firenze, 2004.

Figliola Angelo, Battisti Alessandra, *Post Industrial Robotics*, in «MD Journal», "Design and industry 4.0 revolution", n.4, 2017.

Frampton Kenneth, *The Evolution of 20th century architectur*e, Springer, Londra, 2007.

Galimberti Umberto, *Psiche e techne*, Feltrinelli, Milano , 2016/9.

Gangemi Virginia (a cura di), *Architettura e tecnologia appropriata*, Franco Angeli, Milano, 1985.

Giedion Sigfried, *Spazio, tempo e architettura*, Hoepli, Milano, 1954.

Gorman Michael John, *Buckminster Fuller. Architettura in movimento*, Skira Editore, Ginevra-Milano, 2005.

Gramazio Fabio, Kohler Matthias, *Robotic Touch. How robots change architecture*, Park Books, Zurich, 2014.

Gramazio Fabio, Kohler Matthias, *Made by Robots: challanging architecture at a larger scale*, in «AD Architectural Design Magazine», 2014.

Gramazio Fabio, Kohler Matthias, *Digital materiality in Architecture,* Lars Müller Publishers, Baden, 2008.

Gregotti Vittorio, *L'esercizio del dettaglio,* in «Casabella», n.492, 1983, pp. 10-11.

Gregotti Vittorio, *Architettura, tecnica, finalità*, Laterza, Roma, 2002.

Imbesi Lorenzo, *La democratizzazione digitale della professione creativa. The digital democratization of the creative profession*, in «DIID Disegno Industriale», "D_ Generation", n. 29, Roma, RdesignPress, 2007.

Imperadori Marco, Zambelli Ettore, *Costruzione stratificata a secco*, Maggioli, Rimini, 1998.

Kieran Stephen, Timberlake James, *Refabricating architecture,* McGraw-Hill, New York, 2004.

Kolarevic Branko, *Architecture in the digital age: design and manufacturing*, Taylor&Francis, New York, 2003.

Kolarevic Branko, *Manufacturing material effects: rethinking design and making architecture*, Routledge, New York, 2008.

Latanza Antonio, *Al di là della Musica, al di là del Suono L'accordatura dell'Universo, Magia Naturale e umana*, in «I suoni, le onde» rivista della Fondazione Isabella Scelsi, n.10, Roma, 2003, pp.12-16.

Lloyd Thomas Katie, Amhoff Tilo, Beech Nick, *Industries of architecture,* Routledge, New York, 2016.

Losasso Mario, *Percorsi dell'innovazione. Industria edilizia, tecnologie, progetto*, Clean Edizioni, Napoli, 2010.

Lotti Giuseppe, Trivellin Eleonora, *Una possibile strategia per il prodotto italiano*, in «MD Journal», "Design and industry 4.0 revolution", n.4, 2017.

Manfron Vittorio, *Qualità e affidabilità edilizia*, Franco Angeli, Milano, 1995.

Mangiarotti Anna, *Proposte di architettura: interpretazioni tecnologiche e sperimentazioni progettuali*, Clup, Milano, 2005.

Mangiarotti Anna, Paoletti Ingrid, *Dall'idea al cantiere: progettare, produrre e costruire forme complesse,* Hoepli, Milano, 2008.

Mangiarotti Anna, *Gli elementi tecnici del progetto: trasformazioni e possibilità espressive della materia in architettura*, Franco Angeli, Milano, 1989.

Mangiarotti Anna, *Pratica alla via analitica in Architettura*, in Graf F., Albani F. "Angelo Mangiarotti: la tettonica dell'assemblaggio", SilvanaEditoriale, Milano, 2015.

Manzini Ezio, *La materia dell'invenzione*, Arcadia, Milano, 1986.

Manzini Ezio, *Artefatti: verso una nuova ecologia dell'ambiente artificiale*, Domus Academy, Milano, 1990.

Munari Bruno, *Arte come mestiere*, Laterza, Roma, 2001.

Nardi Guido, *Percorsi di un pensiero progettuale*, Maggioli, Rimini, 2010.

Nervi Pierluigi (traduzione di Robert Einaudi), *Aesthetics and technology in building*, Harvard University Press, Cambridge, 1966.

Nervi Pierluigi, *Scienza o arte del costruire?*, Città Studi Milano, Milano, 1997.

Paoletti Ingrid, *Costruire le forme complesse*, Maggioli, Rimini, 2010.

Paoletti Ingrid, Tardini Paola, *Mass innovation: emerging technologies in construction,* Maggioli, Rimini, 2011.

Paoletti Ingrid, Naboni Roberto, *Advanced Custumization in architectural design and construction*, Springer, London, 2015.

Perriccioli Massimo, *Officina del pensiero tecnologico*, Alinea, Firenze, 2010.

Picon Antoine, *Digital culture in architecture: an introduction for the design professions*, Birkhäuser, Basilea, 2010.

Pongratz Christian, Perbellini Maria Rita, *Nati con il computer*, Testo&immagine, Torino, 2000.

Sinopoli Nicola, Tatano Valeria, *Sulle tracce dell'innovazione*, Franco Angeli, Milano, 2002.

Sinopoli Nicola, *Cinquant'anni di innovazioni tra domanda e mercato*, in Sinopoli N., Tatano V., "Sulle tracce dell'Innovazione", Franco Angeli, Milano, 2002, pp. 7-20.

Slaughter Sarah E., *Model of construction innovation*, in «Journal of construction engenering and construction», vol. 124, n. 3, maggio/giugno 1998, pp. 226-231.

Tatano Valeria (a cura di), *Materiali naturartificiali. Tendenze innovative nel progetto di architettura*, Officina Edizioni, Roma , 2006.

Tatano Valeria (a cura di), *Dal manuale al web: cultura tecnica, informazione tecnica e produzione edilizia per il progetto di architettura*, Officina Edizioni, Roma, 2007.

Torricelli Maria Chiara, *Materiali e tecnologie dell'architettura*, Laterza, Roma, 2001.

Vittoria Eduardo, *Le tecnologie devianti dell'architettura*, in Fabbri M., Greco A. (a cura di), "Architetture per il terzo millennio - una seconda rivoluzione rubana?", Fondazione Adriano Olivetti, Roma, 1988.

Wigley Mark, *Whatever Happened to Total Design?*, in «Harvad Design Magazine», n.5 "Design Arts and Architecture", 1998.

Yablonina Aria, Prado Marshall, Baharlou Ehsan, Schwinn Tobias, Menges Achim, *Mobile robotic fabrication system for filament structures* in Bob Sheil, Achim Menges, Ruairi Glynn and Marilena Skavara, "Fabricate 2017", UCL Press, 2017, pp. 202-209.

Yuan Philip, Menges Achim, Leach Neil (a cura di), *Robotic Futures*, Tongji University Press, Shanghai, 2015.

Zanuso Marco, *Scritti sulle tecniche di produzione e di progetto*, Silvana Editoriale, Milano, 2013.

L'architettura in legno

L'impiego del legno in architettura ha una lunga storia, caratterizzata tra tradizioni locali legate al territorio e ancora oggi tramandate. Accanto a questi usi, sono stati introdotti nel mercato nuovi prodotti a base di legno che hanno ridefinito l'impiego di questo materiale in architettura. I riferimenti riportati di seguito sono utili a ricostruire l'evoluzione dell'impiego di questo materiale in edilizia, le innovazioni introdotte per ottimizzarne l'uso e soprattutto la natura di questo materiale, con particolare attenzione alla sua produzione e al suo smaltimento.

Barbisan Umberto, *Lo scheletro portante,* Pitagora, Bologna, 2005.

Barbisan Umberto, *Il legno: tradizione e innovazione*, Ca' Zorzi Edizioni, Forlì, 2008.

Bonamini Gabriele, *Durata, durabilità e durevolezza del legno*, Linkedin, 20 giugno 2017.

Buchanan Andy, Carradine David, Beattie Greame John, Morris Hugh, *Performance of houses during the Christchurch earthquake of 22 February 2011*, in «Bull NZ Soc Earthq Eng», 44(4), 2011.

Campa Maria Rita, *Le Nouvelles inventions di Philibert de l'Orme*, Aracne, Roma, 2009.

Cenci Giovanni, Cenci Sabina, *Ok,* in «Struttura Legno», 2013, pp. 20-23.

De Rosa Biancamaria, Cicerani Stefano, Grillo Nicola, *Rifiuti da costruzioni, demolizioni e scavi,* Geva, Roma, 2007.

Ervedo Giordano, *Il legno come protagonista del sistema ecologico e di quello energetico: il suo rapporto con l'uomo sotto l'aspetto culturale ed economico*, "in Federlegno Arredo (a cura di), "Il legno e l'edilizia", Convegno SAIE, Bologna", 1979.

Funes Nova Angelo, *Il legno così com'è,* Il quadrato, Arese, 2002.

Giachino Davide Maria, *Legno: manuale per progettare in Italia,* Utet, Torino, 2013.

Heppel Cristophe, *Restaurant de montagne, Obereggen, Italie: Peter Pichler et Pavol Mikolacjak*, in Moniteur Architecture AMC, fasc. 259, 2017, pp. 98-101.

Hugues Jacquet (a cura di), *Le Bois,* Actes Sud, 2015.

INFC, *Le stime di superficie. Estensione e composizione dei boschi italiani*, 2005. Disponibile su https://www.sian.it/inventarioforestale/jsp/documentazione.jsp, presa visione nel Dicembre 2016.

ISPRA, *Rapporto rifiuti speciali*, Roma, 2016.

Killer Josef, *Die werke der Baumeister Grubenmann*, Birkhäuser Verlag, Basilea, 1985.

Klaus Zweger, *Wood and Wood joints*, Birkhauser, Basel, 2015.

Laner Franco, *Durablità delle opere lignee: progettare la sua facile sostituzione*, in "Il mio legno", Stevan Elevatori, Settimo Pescantina (VR), 2018, pp.90-101.

Michael H. Ramagea, Henry Burridgeb, Marta Busse-Wicherc, George Feredaya, Thomas Reynoldsa, Darshil U. Shaha, Guanglu Wud, Li Yuc, Patrick Fleminga, Danielle Densley-Tingleye, Julian Allwoode, Paul Dupreec, P.F. Lindenb, Oren Schermane, *The wood from the trees: The of timber in construction*, in «Renewable and Sustainable Energy Reviews», Volume 68-1, 2017, pp.333-359.

Parent Mary Neighbour, *The Roof in Japanese Buddhist Architecture*, Weatherhill, New York and Tokyo, 1983.

Tanizaki Junichiro (a cura di Mariotti Giovanni), *Libro d'ombra*, Bompiani, Milano, 1995.

Thoma Erwin, *La natura del legno*, EdicomEdizioni, 2009.

Prospettive di sviluppo della carpenteria lignea

La seconda sezione dedicata all'architettura in legno riguarda più precisamente la lettura del mercato delle costruzioni in carpenteria lignea. Tale ricerca è stata condotta individuando una serie di casi di studio ai quali è riferita la maggior parte delle fonti riportate, e alla modalità di impiego degli strumenti dell'automazione per la produzione delle strutture lignee. Articoli scientifici, report di associazioni di categoria, video di cantiere contribuiscono a descrivere una realtà produttiva molto eteregonea, in cui l'automazione viene impiegata con diverse finalità.

AA. VV., *Origami Timber Construction*, in «Blumer-Lehmann News», n.10, dicembre 2017, p.4.

AA. VV., Vidy, Théatre Lausanne, Théatre Vidy Lausanne, 2017.

Menges Achim, Schwinn Tobias e Krieg Oliver D., *Advancing wood architecture: a computational approach*, Routledge, London, New York , 2017.

AA. VV., *ICD / ITKE Research Pavilion 2015-16*, in C3 Korea, n. 383, 2016, pp. 22-31.

AA. VV., *Maggie's Cancer Centre Manchester*, in Arca international, n. 131, 2016, pp. 40-47.

AA. VV., *Mannheim Multihalle,* Department of Civil and Environmental Engineering, Princeton University, 2013. Disponibile su www.shells.princeton.edu/Mann1.html, presa visione dicembre 2018.

AA. VV., *New Maggie's Cancer Center in Manchester*, in C3 Korea, n. 383, 2016, pp. 32-45.

AA. VV., *Oberholz mountain hut*, in Arca international, n. 139, Novembre 2017, pp. 77-83.

AA. VV., *Oberholz mountain hut*, in Arketipo, n. 110, aprile 2017, pp. 10-15.

Acimall, *L'industria italiana delle macchine e degli utensili per la lavorazione del legno. Rapporto annuale*, Ufficio studi Acimall, Milano, 2018.

Banti Sara, *Spazi terapeutici*, in Abitare, n. 568, 2016, p. 35-44.

Brandt Katarina, *Japanese Details and Swiss Precision*, in Wood Magazine, n.3, 2013.

Ciccarelli Lorenzo, *Nido d'infanzia a Guastalla, Reggio Emilia*, in Industria delle costruzioni, vol. 50, n. 450, 2016, pp. 50-57.

CRESME, Fondazione Symbola, *Una nuova edilizia contro la crisi,* I quaderni di Symbola, 2017.

Federlegno Arredo, *2 Rapporto case ed edifici in legno*, 2017.

Federlegno Arredo, *Il legno e l'edilizia,* Convegno SAIE, Bologna, 1979.

Fodella Gianni, *Il legno nel sistema economico italiano*, in Federlegno Arredo (a cura di), "Il legno e l'edilizia", Convegno SAIE, Bologna, 1979.

Fuchs Claudia, *Bergrestaurant in Obereggen. Mountain restaurant in Obereggen*, in Detail, vol. 57 (12), dicembre 2017, pp. 40-43.

Jeska Simone, Pascha Khaled Saleh, *Emergent timber technlogies. Materials Structures engineering projects*, Rainer Hascher, Technische Universitat Berlin, Berlino, 2015.

Laner Franco, *Vecchi morfemi per nuovi tecnemi*, in «Materia», n. 36, Firenze, set-dic 2001, pp. 22-27.

Maddock Richard, De Kestelier Xavier, Ridsdill Smith Roger, Haylock Darron, *Maggie's at the the Robert Parfett Building*, Manchester, in Sheil B., Menges A., Glynn R. and Skavara M., "Fabricate 2017", UCL Press, London, 2017, pp. 74-81.

Pagliari Francesco, *Nido comunale d'infanzia, Guastalla, Italia: MCA Mario Cucinella Architects*, in The Plan, n.87, 2015, pp. 100-106.

Pearman Hugh, *Wood Awards 2016*, in RIBA journal, vol. 123, n. 12, 2016, pp. 69-86.

Plackner Hannes, *Austria's glulam export balance suffers from losses in Japan*, in "Timber Online", 8 settembre 2014. Disponibile su www.timber-online.net/schnittholz/2014/09/austria_s_glulamexportbalancesuffersfromlossesinjapan.html, presa visione dicembre 2018.

RILEGNO, *Programma specifico di previsione*, 2016.

Robeller Christopher, Gamerro Julien, Yves Weinant, *Théâtre Vidy Lausanne - A Double-Layered Timber Folded Plate Structure*, in Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, vol. 58, n. 4, dicembre 2017, pp. 295-314.

Thomas Herzog, et al., *Construire en bois*, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005 (third edition).

UNECE/FAO, *Forest Products Annual Market Review, 2016-2017,* UNECE, Ginevra, 2017.

Weinand Yves, *Advanced timber structures: architectural designs and digital dimensioning*, Birkhauser, Basilea, 2017.

Willmann Jan, Knauss Michael, Bonwetsch Tobias, Apolinarska Anna Aleksandra, Gramazio Fabio, Kohler Matthias, *Robotic timber construction - Expanding additive fabrication to new dimensions Automation* in Construction, n. 61, Elsevier, 2016, pp. 16-23.

Glossario

Il seguente glossario riporta il significato dei termini chiave emersi nella tesi, in alcuni casi si tratta di parole nuove, in altri di parole il cui significato si è trasformato in relazione al contesto di riferimento. Tali definizioni riguardano concetti del mondo dell'automazione, della carpenteria in legno, della produzione, della progettazione, della robotica. Il glossario non include i termini tecnici e i riferimenti agli strumenti, che trovano definizione all'interno della tesi nelle schede di riferimento.

Androide

Robot dalle sembianze antropomorfe: rispetto dall'automa è dotato di un sistema elettronico e un sistema informatico.

Automa

Macchina capace di operare in maniera autonoma attraverso meccanismi, quali ingranaggi o reazioni di natura chimica o fisica. L'automa può avere diverse sembianze, non necessariamente antropomorfe o zoomorfe: le caratteristiche relative a questo aspetto dell'automa sono di norma definite in funzione degli scopi e degli ambiti per il quale l'automa viene progettato. L'automa a differenza dell'androide non è dotato di sistema elettronico e sistema informatico.

Automazione

Processo in cui il circostanziale controllo umano è ridotto al minimo. Originariamente il termine si riferiva al controllo digitale di un processo e alla capacità di renderlo quanto più automatizzato: l'automatizzazione tuttavia si riferisce a una specifica operazione o lavorazione che viene eseguita in maniera automatica. L'automazione propria di un ciclo operativo complesso è caratterizzata dalla capacità di autoregolarsi attraverso il riconoscimento di impulsi esterni e della strategia più opportuna da eseguire per raggiungere l'obiettivo: l'autoregolazione non corrisponde all'intelligenza artificiale che è caratterizzata dalla memoria dei feedback passati e dalla capacità di calcolo e rielaborazione dei dati accumulati.

Automazione consapevole

Attività di formazione per un aggiornamento e una tutela della cultura materiale, volto ho allo sviluppo dell'*headmade*. Attraverso l'automazione consapevole si conoscono le potenzialità delle macchine e si costruisce un quadro di riferimento fatto di esempi, di terminologia e di soluzioni progettuali possibili e alternative, relazionate agli strumenti dell'automazione.

BIM

BIM è l'acronimo di *Building Information Modeling* e indica l'impiego di un modello digitale parametrico condiviso. Il modello può contenere numerose informazioni relative a un unico prodotto più o meno complesso: nel caso dell'edilizia, il BIM può essere utilizzato durante l'intero iter progettuale e per la manutenzione e il monitoraggio di un manufatto. Il BIM può essere supportato con diversi software (tra i più noti Autodesk Revit, Graphisft Archicad, Vectoworks) e contribuisce a ridefinire lo sviluppo del progetto nei tempi e nell'iter procedurale, poiché permette la simultaneità e l'interoperabilità delle mansioni coinvolte.

Braccio robotico

Robot con sembianze di braccio umano, poiché composto da elementi rigidi (link) ed giunti (joint). Le parti del braccio robotico vengono indicate con termini umani: spalla, gomito, polso sono ad esempio i giunti che possono ruotare attorno a un particolare asse o traslare, e sono definiti come DOF *Degrees of Freedom*, gradi di libertà. La combinazione tra più giunti permette di eseguire movimenti complessi: maggiore è il numero dei DOF, maggiori saranno i movimenti che potrà eseguire il braccio.

Carpenteria diffusa

Scenario in cui le lavorazioni tipiche della carpenteria lignea possono essere eseguite da una rete di imprese distribuite in maniera capillare sul territorio e tra loro legate dall'attività di progettazione e da una cultura tecnica che possono essere condivise. In questo modo, la competenza e la cultura materiale proprie di artigiani e carpentieri possono essere messe a sistema e a disposizione del progetto d'architettura.

CAD

CAD è l'acronimo di *Computer Aided Design*, Progettazione Assistita dal Computer. Indica un'elaborazione progettuale attraverso software digitali per il disegno: i primi software permettevano di controllare solo i principali aspetti formali del progetto, successivamente hanno trovato un più ampio sviluppo grazie all'interazione con i diversi campi dell'ingegneria che hanno connotato i software di funzioni utili a controllare altri parametri di progetto, ad esempio quello economico, meccanico o fisicotecnico.

CAM

CAM è l'acronimo di *Computer Aided Manufacturing*, Produzione Assistita dal Computer. Indica un metodo di lavorazione e produzione attraverso software digitali capaci di leggere un modello digitale (bidimensionale e tridimensionale) e di trasformare le informazioni del modello in istruzioni per le macchine e per il percorso utensile.

CNC

CNC è l'acronimo di *Computer Numerical Control*, Macchine a controllo numerico computerizzato. È considerata l'evoluzione della macchina utensile, poiché è in grado di riprodurre un gesto lavorativo attraverso un comando informatico. Con macchina CNC non si intende uno specifico strumento, ma una categoria di macchinari, basati sull'impiego di un software CAM (*Computer Aided Manufacturing*) in grado di muovere un utensile fisso o intercambiabile, su differenti assi, che costituiscono i gradi di libertà di una macchina. Una macchina CNC multifunzione, capace cioè di eseguire più tipologie di lavorazione per l'alto numero di gradi di libertà e un magazzino utensili, è definito anche centro di taglio.

Centro di taglio

Si veda CNC.

Customizzazione

Processo di produzione di un bene o di un servizio su richiesta del cliente; tale processo è inteso come adattamento di un modello. La crescente possibilità e la capacità di rispondere puntualmente alle richieste, grazie a un processo produttivo dotato di strumenti sempre più flessibili, stanno contribuendo a ridefinire il concetto stesso di customizzazione, in cui la produzione non necessariamente si riferisce ad altri modelli e consente di realizzare un bene o un servizio considerati unici. Il concetto di customizzazione nasce in riferimento alla produzione di massa (Davis, 1989), per descrivere la capacità di adattamento di una linea di produzione flessibile, rispetto a quella standardizzata e seriale: tale flessibilità consentiva di produrre grandi quantitativi di bene (massa), e di adattare delle varianti di modello prodotto al cliente (customizzazione), definendo tale concetto con customizzione di massa (*mass customization*). La personalizzazione della produzione consente al cliente di modificare un prodotto in serie secondo una gamma di variabili prestabilite; la customizzazione permette di modificare un prodotto in serie introducendo delle variabili proprie del cliente, pur restando in ambiti prestabili; la produzione su misura è invece un processo configurato in funzione della richiesta del cliente, che trova la sua espressione nel concetto di *headmade* (si veda headmade).

DOF Degree of Freedom

Si veda la voce grado di libertà.

Fabbricazione digitale

Processo di progettazione e produzione in cui il bene può essere progettato e programmata attraverso l'impiego di software e strumenti digitali, come macchine a controllo numerico o robot, attivati mediante computer. Il processo di fabbricazione digitale trasforma il valore del gesto produttivo, inteso come gesto per la lavorazione materiale. Con la fabbricazione digitale infatti cambia l'interazione con lo strumento di lavoro, che richiede una programmazione digitale. La fabbricazione digitale è caratterizzata da un intenso processo di progettazione e programmazione, volto a ottimizzare la lavorazione, in termini di precisione, di tempo e di impiego di risorse. La fabbricazione digitale è nota anche come *smart manufacturing, digital manufactuirng, advanced manufacturing*.

Grado di libertà

È la coordinata che descrive il moto di un punto o di un corpo. Ad esempio, un corpo con tre gradi di libertà è un corpo che muoversi nelle direzioni X, Y, Z. Questo valore è utilizzato per identificare la capacità di uno strumento di muovere il mandrino e quindi lo strumento di lavorazione: maggiori saranno i gradi di libertà di una macchina, maggiore sarà la varietà di lavorazioni che potrà eseguire. Nella categoria delle macchine CNC i gradi di libertà sono identificati come assi; nella categoria dei robot sono identificati con l'acronimo DOF *Degrees of Freedom* e sono in funzione della tipologia di giunto tra i bracci (link).

Gesto produttivo

È l'atto della lavorazione materiale attraverso l'impiego di strumenti più o meno complessi (dagli utensili alle macchine). Il gesto produttivo può essere:

manuale, in quanto attivato direttamente dalla forza umana; meccanizzato in quanto sfrutta altre fonti energetiche (animale, acqua, calore, vapore, energia elettrica) e permette la ripetizione del gesto per numerose sequenze; autonomo, in quanto mosso da fonti energetiche elettriche e attivato da comandi digitali o elaborazione di dati interni alla macchina, in risposta a segnali da ambiente esterno (*feedback*).

Headmade

Processo che individua nell'idea del progetto il valore di un bene prodotto, indipendentemente dal gesto produttivo utilizzato (umano, meccanico, autonomo). È un bene che si realizza prima di tutto con la testa (*head*) e che sfrutta le tecnologie digitali, quali software e macchine configurabili, come CNC o robot, per costruire un processo di produzione *ad hoc*. L'*headmade* sviluppa una produzione strettamente connessa al progetto, andando oltre l'adattamento di un modello (customizzazione). *Headmade* rappresenta l'insieme delle competenze e dei saperi con cui si governa la materia, basato sul dialogo tra riflessione e azione.

Intelligenza Artificiale

Processo di elaborazione di soluzioni attraverso deduzioni e supposizioni in relazione a un contesto, riproducendo in maniera quanto più simile il processo dell'intelletto umano. L'intelligenza artificiale è una disciplina complessa: può essere utilizzata in differenti campi e assumere differenti forme, non sempre riconoscibili attraverso le sembianze di un robot.

Industria 4.0

Processo di trasformazione della produzione attraverso l'impiego dell'automazione. A seguito delle tre precedenti rivoluzioni industriali (introduzione del vapore, dell'energia elettrica, della digitalizzazione), la quarta rivoluzione introduce l'impiego dell'automazione. I piani di finanziamento a livello nazionale e internazionale a supporto delle aziende in questo processo di trasformazione, sono identificati con il termine Industria 4.0: nel 2011 viene introdotto in Germania il "Zukunftsprojekt Industrie 4.0" (entrato in vigore nel 2013), in Italia invece il "Piano nazionale Industria 4.0" nel 2016 (entrato in vigore nel 2017), noto anche come Piano Calenda.

Macchina

Sistema complesso di elementi capace di compiere un lavoro (un'azione), composto da più parti mosse da una forza motrice che esegue operazioni tecniche precedentemente eseguite da una o più persone.

Macchina utensile

Strumento più complesso che si distingue dal semplice utensile perché sfrutta una fonte energetica differente da quella umana e riproduce un gesto in maniera automatica.

Manifattura

Lavorazione eseguita tramite mano o macchina per la produzione di un bene. Questo termine oggi fa riferimento anche al settore industriale, ma il termine in realtà indicava una produzione differente da quella eseguita in fabbrica du-

rante la Prima rivoluzione industriale, in cui gli strumenti non erano ancora in grado di eseguire le lavorazioni in maniera precisa. Manifattura pertanto si riferiva a una lavorazione più accurata e quindi a un prodotto finale di qualità superiore.

Manifatttura additiva e sottrattiva

Lavorazione che identifica i processi di aggiunta e deposito materiale, e i processi di asportazione materiale da un elemento solido. Nel caso della produzione edilizia ad esempio, nella manifattura additiva si impiegano materiali plastici, spesso polimeri, ma anche argilla o calcestruzzo, mentre nella manifattura sottrattiva si utilizzano materiali solidi, sia naturali che artificiali, come il legno massello o pannelli a tavole incrociate.

Manifattura ibrida

Manifattura capace di utilizzare le competenze artigianali su scala industriale e di replicarle ove necessario. L'ibridazione di artigianato e industria è reso possibile dall'impiego dell'automazione: la dimensione industriale non è più replicatore di elementi standard ma diviene replicatore di qualità, in cui ciò che viene eseguito ripetutamente non è la lavorazione di un medesimo prodotto, ma la variabilità dei gesti produttivi volti a rispondere ai differenti progetti tecnologici.

Materialità digitale

Materia legata alle leggi fisiche e potenziata dalle informazioni digitali: è una materia che contiene dati e che può essere progettata e lavorata tramite software e strumenti come CNC o robot. Questa definizione è stata introdotta da Fabio Gramazio e Matthias Kohler (2008).

Meccanizzazione

Trasferimento di un gesto lavorativo manuale e una macchina utensile, capace di riprodurre in maniera ripetitiva lo stesso gesto.

Personalizzazione

Produzione di un bene o di un servizio che consente al cliente di modificare un prodotto in serie secondo una gamma di variabili prestabilite. Si distingue dalla customizzazione poiché quest'ultima permette di modificare un prodotto in serie introducendo delle variabili non prestabilite.

Robot

Strumento meccanico più o meno autonomo, dotato di un sistema elettronico e informatico, capace di riprodurre e potenziare attività eseguite dall'uomo. Il robot può essere sostitutivo o collaborativo, se prevede l'interazione con l'uomo. Il robot può avere infinite configurazioni fisiche: il robot viene definito androide, quando le sue sembianze sono antropomorfe.

Robotica

Settore dell'automazione riferita a una tipologia di strumentazione caratterizzata da differenti gradi di libertà e dalla flessibilità di tipologie di lavorazione. La robotica può essere sociale, di servizio o industriale.

Ringraziamenti

Gli anni del Dottorato di Ricerca sono stati un percorso importante, nella disciplina della Tecnologia dell'Architettura e nel mondo professionale: non sarebbero stati tali senza alcune persone.

Ringrazio la prof.ssa MariaAntonia Barucco per avermi insegnato a guardare oltre i confini e oltre i luoghi comuni, e per avermi riportato coi piedi per terra quando le mie visioni ottimistiche prendevano il sopravvento.

Ringrazio i colleghi del laboratorio ArTec, perché non sono semplicemente colleghi.

Ringrazio Emilio, per la pazienza e la fiducia. Ma soprattutto per la pazienza.

Ringrazio la mia famiglia, a partire da Francesco, con cui ho imparato a conoscere la robotica, Giulia, fonte di informazioni introvabili, e i miei genitori, Maria Chiara e Claudio, per il loro sostegno e per insegnarmi costantemente a cercare un lato positivo.

Ringrazio Carlo e Luigi per avermi accolto nella falegnameria, e avermi insegnato tanto, non solo sul legno, ma sulla qualità e la passione per un lavoro.

Ringrazio infine Gregorio, per avermi sempre sostenuto, nelle scelte giuste e in quelle sbagliate, per la battuta sempre pronta capace di strapparmi un sorriso. Avanti tutta!