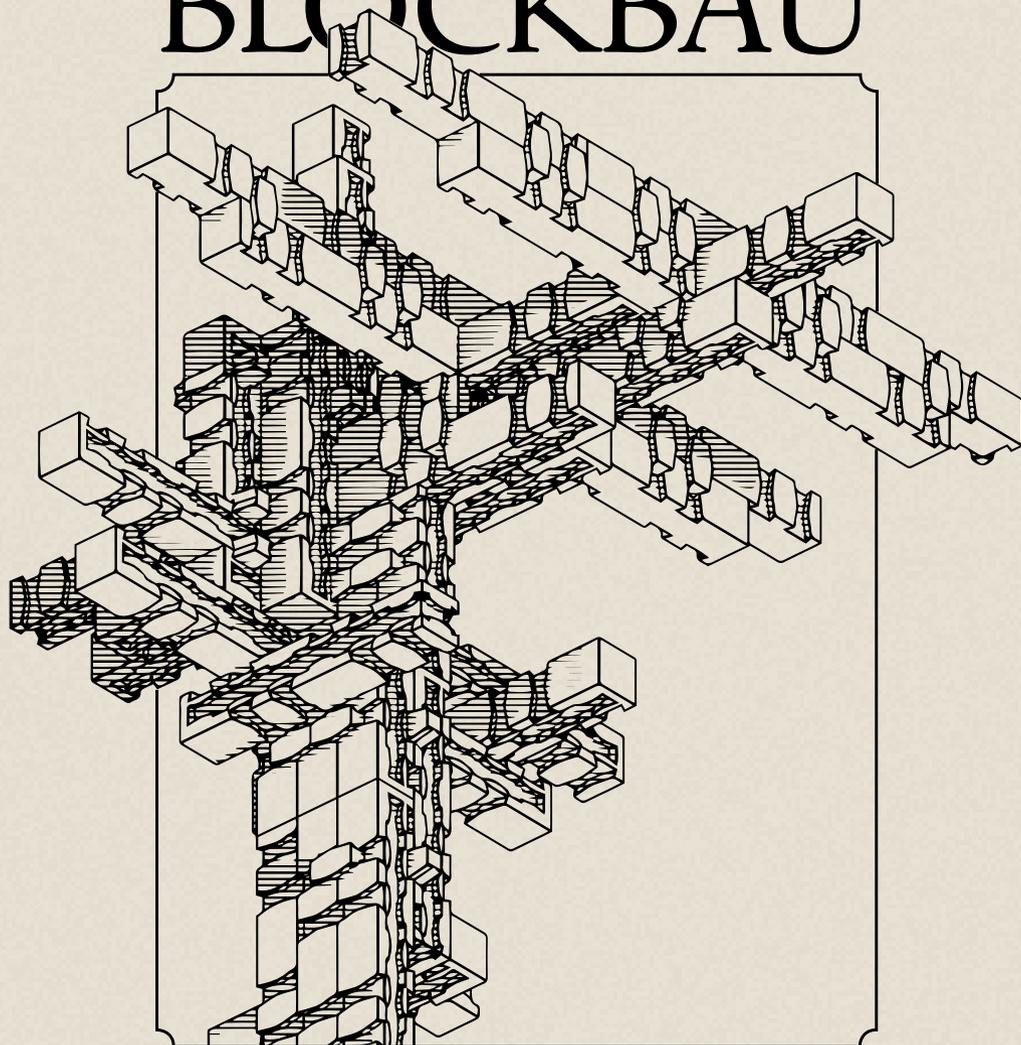


# ARCHITETTURA DISCRETA BLOCKBAU



POLITECNICO DI TORINO E MILANO

**Politecnico di Torino**  
Dipartimento di Architettura e Design  
Anno Accademico 2023/2024



Tesi di Laurea Magistrale in Architettura per la Sostenibilità  
Honour Program Alta Scuola Politecnica - XVIII Cycle

## **ARCHITETTURA DISCRETA BLOCKBAU**

### **RELATRICE TORINO**

Roberta Ingaramo

### **RELATORE MILANO**

Pierpaolo Ruttico

### **AZIENDA**

Studio RAP - Rotterdam  
Indexlab - Politecnico di Milano

### **CANDIDATO**

Matteo Deval  
Matricola 295736

A mamma e papà che hanno sempre  
creduto in me. Grazie per il tutto il  
supporto sempre ricevuto

# ABSTRACT

*“Dobbiamo considerare l'arte della costruzione in legno come la madre della progettazione architettonica, un tale approccio può dare frutti anche al di là di questo materiale”*

(Hermann Phleps, 1942)

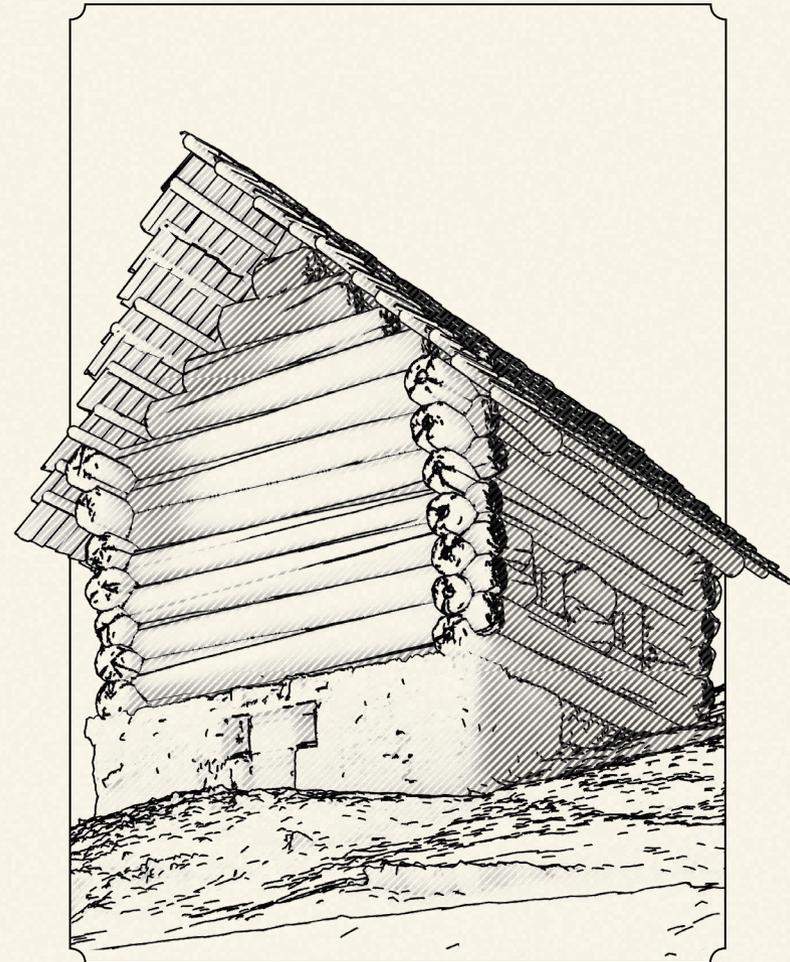
L'architettura blockbau è forse il primo archetipo di metodologia costruttiva che incarna i principi dell'architettura per il riuso e anticipa in qualche maniera i concetti dell'architettura discreta. Questo perché è intrinseca nella sua essenza la qualità di discernere, particellizzare e discretizzare lo spazio secondo unità volumetriche semplici, ossia esattamente il campo di ricerca che interessa l'architettura discreta. Quest'ultima non è al tempo stesso da confondere con la sfera dell'architettura modulare, per la quale vale ancora il principio della funzionalità del componente, ove trave equivale a orizzontalità e pilastro equivale a verticalità. L'utilizzo, invece, nell'architettura discreta di componenti universali - denominati digital materials - porterebbe potenzialmente alla nascita di ciò che potrebbe essere definita una vera architettura per il riuso; sino ad oggi, infatti, molteplici sistemi costruttivi sono stati presentati secondo questa deno-

minazione per il solo merito di utilizzare sistemi costruttivi a secco decostruibili. Ma in qualità di progettisti dell'oggi, con quale arroganza, ci si dovrebbe domandare, ci si arroga il diritto di decidere noi quale componente è da produrre in maniera personalizzata per il nostro specifico progetto? Come possiamo disinteressarci di come questi componenti prodotti per noi ad-hoc - seguendo chiaramente le nostre più dettagliate necessità in termini di dimensione, sezione e forma - dovrebbero essere potenzialmente riutilizzati in futuro in una nuova e differente architettura? La superficiale equazione “architettura decostruibile = architettura per il riuso” nell'odierno contesto dell'economia circolare non può essere più una soluzione: così come l'architetto dell'oggi ha il privilegio di poter scegliere la libertà espressiva della sua opera, anche l'architetto del domani - che riutilizza i componenti del primo - deve poterlo avere. In questo contesto di ricerca accademica nasce l'idea di LokAlp, il sistema costruttivo discreto che propone di tradurre il sapere della tradizione architettonica blockbau secondo i nuovi termini della digital fabrication e del computational design.

# INDICE

	Abstract . . . . .	7
TRADIZIONE	<b>I. L'UNICITA' DELL'ARTIGIANATO</b>	
	1.1 - Il Sistema parete blockbau . . . . .	16
	1.2 - Le connessioni lignee blockbau . . . . .	26
AUTOMAZIONE	<b>II. LA SCALABILITÀ DELL'AUTOMAZIONE</b>	
	2.1 - La meccanizzazione del prodotto . . . . .	50
	2.2 - L'obsolescenza della standardizzazione . . . . .	68
	<b>III. IL RIFIUTO DELL'UNIFORMITÀ</b>	
	3.1 - Digital Fabrication . . . . .	82
	3.2 - Computational Design . . . . .	88
	3.3 - I limiti dell'architettura continua . . . . .	96
	<b>IV. LA STANDARDIZZAZIONE DIGITALE</b>	
	4.1 - Le declinazioni della modularità . . . . .	106
4.2 - Digital Material . . . . .	130	
4.3 - L'architettura discreta . . . . .	138	
PROGETTO	<b>V. ARCHITETTURA DISCRETA BLOCKBAU</b>	
	5.1 - Il Blockbau è discreto . . . . .	160
	5.2 - LokAlp . . . . .	180
	5.2.1 - Progettazione . . . . .	181
	5.2.2 - Produzione . . . . .	228
	5.2.3 - Esposizione . . . . .	252
	5.3 - Brevetto . . . . .	286
	5.4 - Scenari futuri . . . . .	294
	Conclusioni . . . . .	305
	Bibliografia . . . . .	309
Lista immagini . . . . .	315	

- Capitolo I -  
L'UNICITÀ  
DELL'ARTIGIANATO



## Premessa

Hermann Phleps è considerato come uno degli ultimi maestri dell'architettura lignea europea tradizionale. Notando la sua data di nascita - 1 giugno 1877 - ci si può stranire di come un uomo del suo tempo abbia dedicato la sua intera carriera all'architettura vernacolare e rurale lignea, mentre nel contempo i suoi colleghi Gropius, Wright e Le Corbusier scrivevano la storia del Movimento Moderno. Forse è proprio questo il merito alla carriera più significativo di Phelps: pur partecipando attivamente ai dibattiti architettonici dell'epoca, il suo profondo interesse verso l'architettura del passato lo ha portato a scrivere una pietra miliare della letteratura riguardante i metodi costruttivi blockbau e più in generale lignei.

Der Blockbau sarebbe stata la prima delle sue due opere principali, redatta all'età di 65 anni dopo aver già scritto più di cento saggi e articoli - oltre che una dozzina di libri - legati alla sfera tradizionale dell'architettura in legno. La sensazionalità di questo libro risiede nel fatto che è forse il primo della sua epoca ad aver analizzato in maniera estremamente maniacale l'intero processo tecnico-produttivo per la costruzione di un manufatto ligneo, partendo nel descrivere con quali metodi deve essere scelta una specifica specie di pianta, sino alla descrizione accurata di ogni singolo strumento manuale per il corretto taglio di un incastro a coda di rondine.

L'opera in questione è stata essenziale per l'avvio di questo progetto di ricerca, il quale ha l'obiettivo di riproporre in chiave contemporanea le conoscenze e le tecniche della tradizione lignea europea. Il successivo capitolo tratterà dunque le parti essenziali dell'opera di Phelps che sono state fondamentali per una chiara comprensione delle differenti geometrie realizzabili con gli incastri lignei, ponendo un particolare accento su vantaggi e svantaggi di quest'ultimi.



*La diffusione delle costruzioni in legno in Europa. A partire dalla Scandinavia, la costruzione in tronchi forma una catena coerente che passa a est della costruzione a capriate e travi e arriva fino alla Svizzera e ai Balcani. (Phleps 1942, p. 5).*

“Als vornehmstes Ziel gilt für dieses Buch die Erziehung zum werkgerechten Fühlen und Denken in Holz. Es will dem Fachmann wie dem Laien die Schönheiten erschließen helfen, die einer reinen dem Wesen des Holzes angemessenen Architektur innewohnen. Da wir in der Holzbaukunst die Mutter architektonischen Gestaltens erblicken müssen, kann eine solche Betrachtungsweise auch über diesen Werkstoff hinaus seine Früchte tragen.”

*“L’obiettivo primario di questo libro è quello di educare il lettore a sentire e pensare il legno in modo adeguato al lavoro. Si propone di aiutare sia il professionista che il profano a scoprire le bellezze insite in un’architettura pura e adeguata alla natura del legno. Poiché dobbiamo considerare l’arte della costruzione in legno come la madre della progettazione architettonica, un tale approccio può dare frutti anche al di là di questo materiale.”*

**Hermann Phleps, 1942.**

# 1.1 Il sistema parete blockbau

La sensazionalità dell'essere umano di poter sviluppare opere architettoniche quasi mezzo milione di anni fa è stata resa possibile grazie alla caratteristica del legno di essere particolarmente versatile dal punto di vista della produzione di componenti architettonici. L'architettura tradizionale lignea europea ha dimostrato come questo materiale possa essere usato non solo in contesti estremamente variabili, ma di possedere soprattutto la potenzialità di essere facilmente lavorabile per poter sviluppare soluzioni tecnico-architettoniche completamente diverse le una dalle altre. Nello specifico il focus di questo capitolo è di analizzare l'unicità delle centinaia di soluzioni di connessioni e componenti che sono state inventate e successivamente migliorate nel corso dei se-

coli nel contesto della carpenteria lignea europea.

La prima necessità che sorge quando l'essere umano decide di voler circoscrivere uno spazio sorvegliato nella natura è quella di dover creare una divisione tra l'esterno e l'interno, tra spazio non controllato e controllato. Tale necessità si tramuta inizialmente con la costruzione di una recinzione, come nella figura 1 rappresentante uno steccato di tronchi presso Jokkmokk in Svezia. La recinzione, seppur espletando correttamente la funzione divisoria del controllo dell'aria, non funge come riparo dalle intemperie e non ermetizza l'ambiente esterno da quello interno, a causa dei vuoti presenti tra i vari tronchi. La successiva evoluzione della recinzione

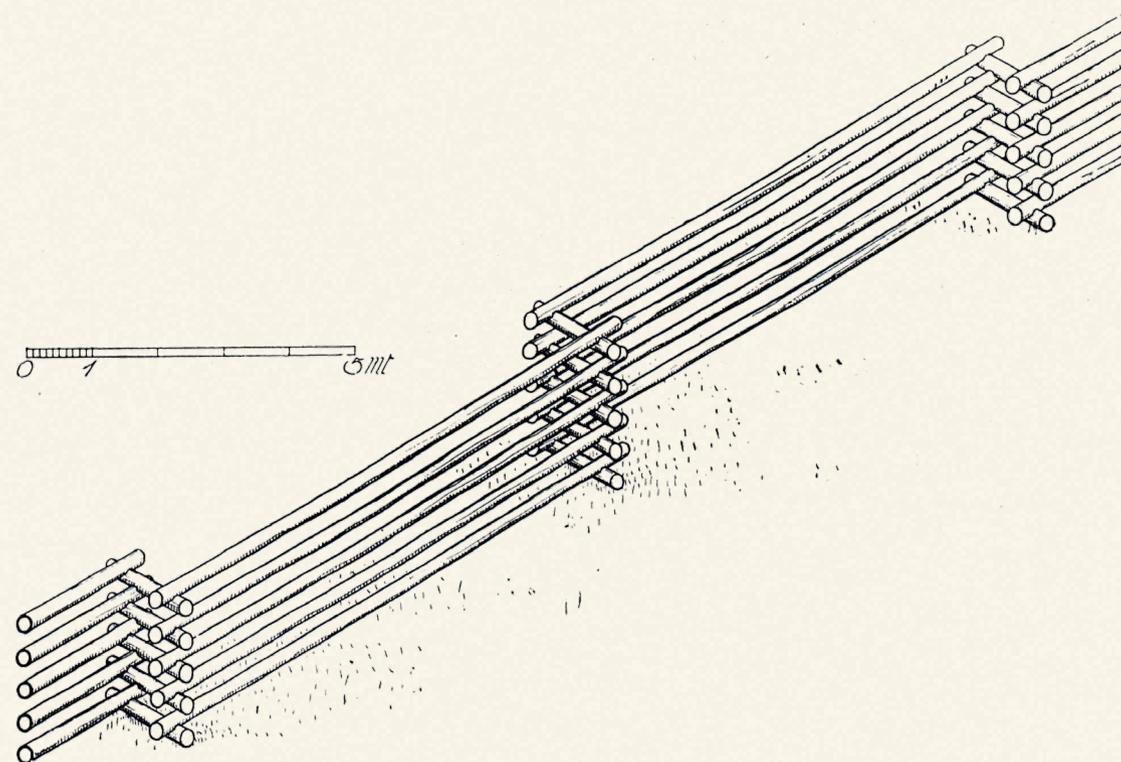


Fig. 1: Recinzione in tronchi di Sjöllarim presso Jokkmokk, Svezia (ridisegnata). Per garantire la stabilità, il muro di recinzione è interrotto da traverse legate ad angolo retto alle estremità delle travi longitudinali. (Phleps 1942, p. 48).

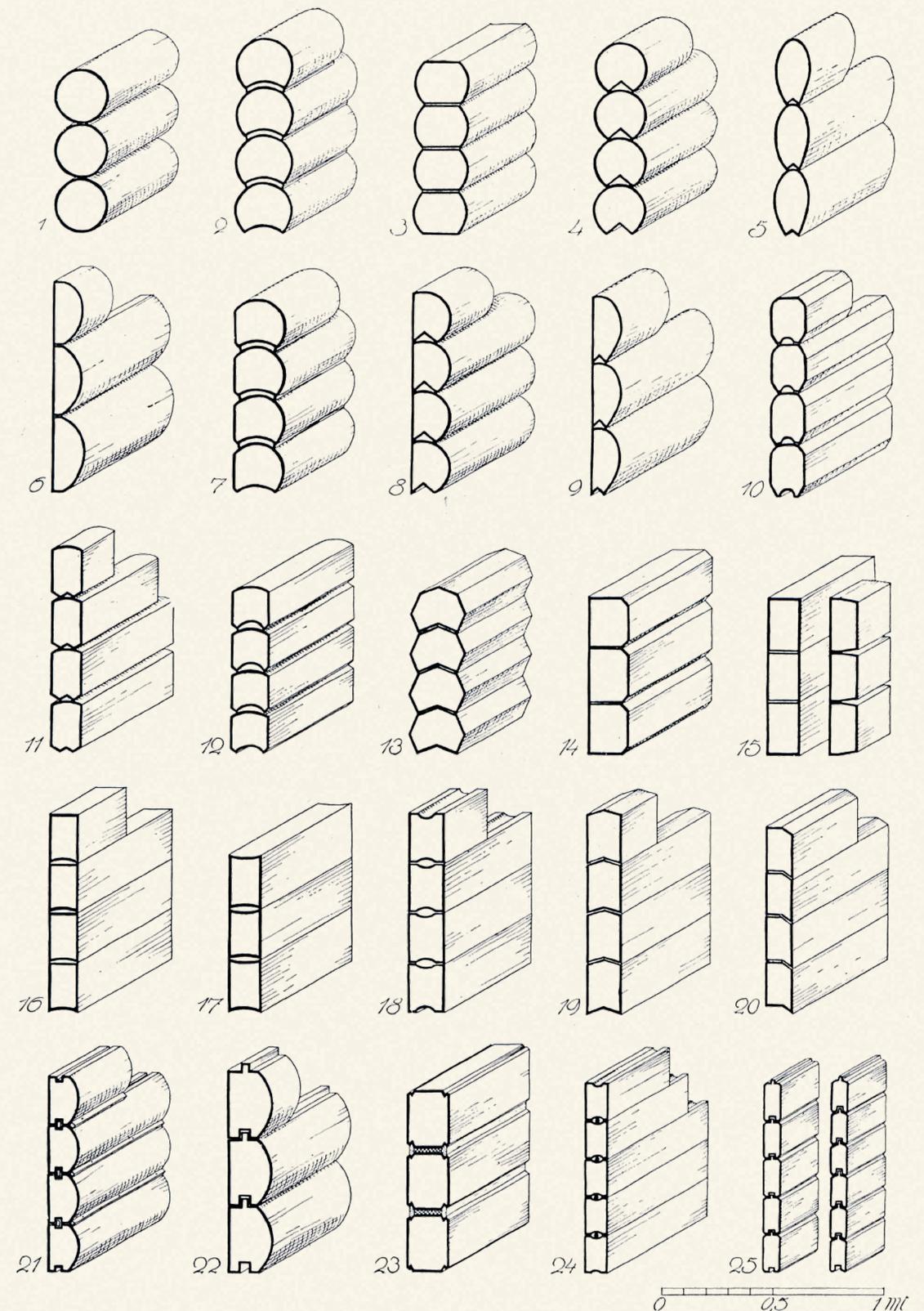
lignea è dunque la saturazione del divisorio tramite ulteriori tronchi, permettendo di avere una divisione solida ed ermetica. Le soluzioni della parete blockbau seguono indubbiamente non solo il livello di tecnica e strumenti che una determinata popolazione era riuscita a traguardare, ma anche la tipologia di specie legno presenti nella regione, il fattore climatico e la conformazione territoriale. La questione più affascinante è senza dubbio il paragone delle differenti soluzioni tecniche e, nello specifico, come alcune popolazioni abbiano ottenuto risultati estremamente simili, in una sorta di "convergenza tecnologica". Gli esempi più antichi giunti a noi delle pareti a blocchi appartengono all'età del bronzo, e le cui testimonianze si possono trovare per esempio nelle palafitte di Persanzig o nell'area archeologica di Buchau sul lago Federsee, in Germania. La prima problematica tecnica per la costruzione di una parete di tronchi cresciuti naturalmente è che, chiaramente, il diametro inferiore del tronco è superiore rispetto al diametro della cima del tronco: per tale motivo bisogna alternare la direzione per ogni strato i differenti tronchi, così da poter compensare i vari diametri ottenendo una parete orizzontale correttamente posizionata.

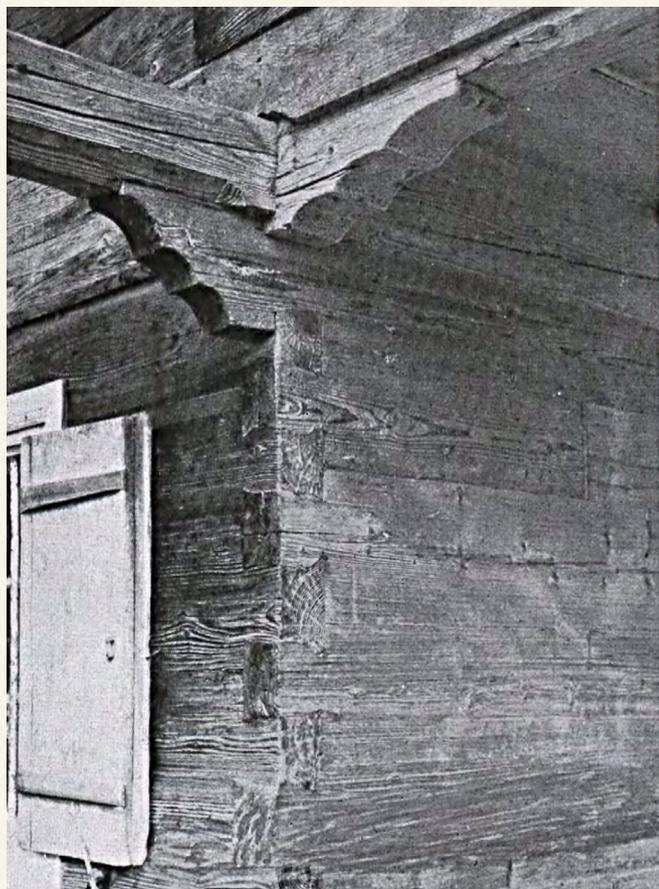
Successivamente, vi è da considerare la giunzione tra i differenti strati di tronchi; nell'assono-

metria 1 della figura 2 - non legata ad una determinata regione - non vi sono presenti alcune lavorazioni nella parte superiore o inferiore di contatto: tale soluzione, ossia la primitiva, pur essendo la più semplice da adottare - in quanto strettamente legata alla natura del legno - presentava differenti problemi dal punto di vista della posa ma soprattutto dal punto di vista degli spiragli d'aria che si venivano a formare tra i differenti tronchi, riducendo fortemente il fattore di isolamento della struttura. Con lo sviluppo dell'artigianato e il connesso stile costruttivo, il sistema parete iniziò a presentare ricche variazioni dal punto di vista delle sezioni del tronco: la prima serie di variazioni, dalla 2 alla 4, mantengono la forma naturale del tronco intero, presentando però delle lavorazioni - come piallatura della superficie di contatto su entrambi i lati oppure con l'incisione di un canale curvo o ad angolo retto - per una migliore adesione tra i differenti tronchi. Un caso interessante è l'assonometria n.5: per attenuare le crepe e probabilmente anche sotto spinta di un certo sentimento artistico, la sezione circolare - che presenta la medesima resistenza in tutte le direzioni - viene intagliata ad ovale, evidenziando dunque l'espressione del flusso di forze lungo l'asse verticale e rimuovendo la parte di legno superflua; la soluzione "ovale" verrà più volte paragonata da Ph-

Fig. 2: Sezioni trasversali di muri a blocchi di varia forma. (Phelps 1942, p. 51)

- No specifica regione | 1
- Svezia - Russia | 2
- No specifica regione | 3
- Norvegia | 4
- Paesi di lingua tedesca | 5
- Svizzera | 6
- Svezia - Russia | 7
- Norvegia | 8
- Paesi di lingua tedesca | 9
- Svizzera | 10
- Svezia | 11
- Svezia | 12
- Francia | 13
- Terzo Reich/Svizzera | 14
- Terzo Reich/Svizzera | 15
- Terzo Reich/Svizzera | 16
- Terzo Reich/Svizzera | 17
- Terzo Reich/Svizzera | 18
- Terzo Reich/Svizzera | 19
- No data | 20
- Svizzera | 21
- Slesia | 22
- Sezione industriale | 23
- Sezione industriale | 24





*Fig. 3: Vista parziale di una casa di Arzbach, vicino a Lenggries, in Alta Baviera, con rinforzi angolari a coda di rondine. I tronchi sono stati sagomati come mezzi legni mediante spaccatura e incastro. Il trattamento del legno prima del montaggio e la lavorazione hanno fatto sì che, in primo luogo, non ci fossero quasi crepe e, in secondo luogo, che le giunzioni fossero così strette da essere difficilmente visibili a occhio nudo (Phleps 1942, p. 54).*

leps come “muscoli in tensione”, sottolineando una certa bravura da parte del carpentiere di riuscire a far esprimere visivamente come il materiale legno lavorasse fisicamente in maniera armonica con il resto della struttura. Le successive assonometrie, dalla 6 alle 9, sono semplicemente la variazione delle sopra citate 4 assonometrie ma spaccate con ascia e cuneo come mezzo tronco. Un'ulteriore tendenza che ha presentato molteplici variabili, e che di fatto è quella adottata nei giorni nostri, considera di variare dalla sezione originale rotonda a quella rettangolare: in questo caso, come evidenziato nelle assonometrie da 14 a 20 e 23, era possibile ottenere delle superfici lisce in entrambi i lati della parete e, nel caso di carpentieri particolarmente talentuosi, i giunti tra le differenti travi diventavano così stretti da addirittura scomparire pure ad una attenta analisi a occhio nudo, come nella figura 3. Le ultime due assonometrie della figura 2 appartengono invece a sezioni moderne prodotte industrialmente da macchine agli inizi del XX secolo: riducendo sempre di più la parte strutturalmente superflua della sezione si è giunti a spessori di 7 centimetri, considerati allora la dimensione più piccola che garantiva ancora una adeguata protezione termica.

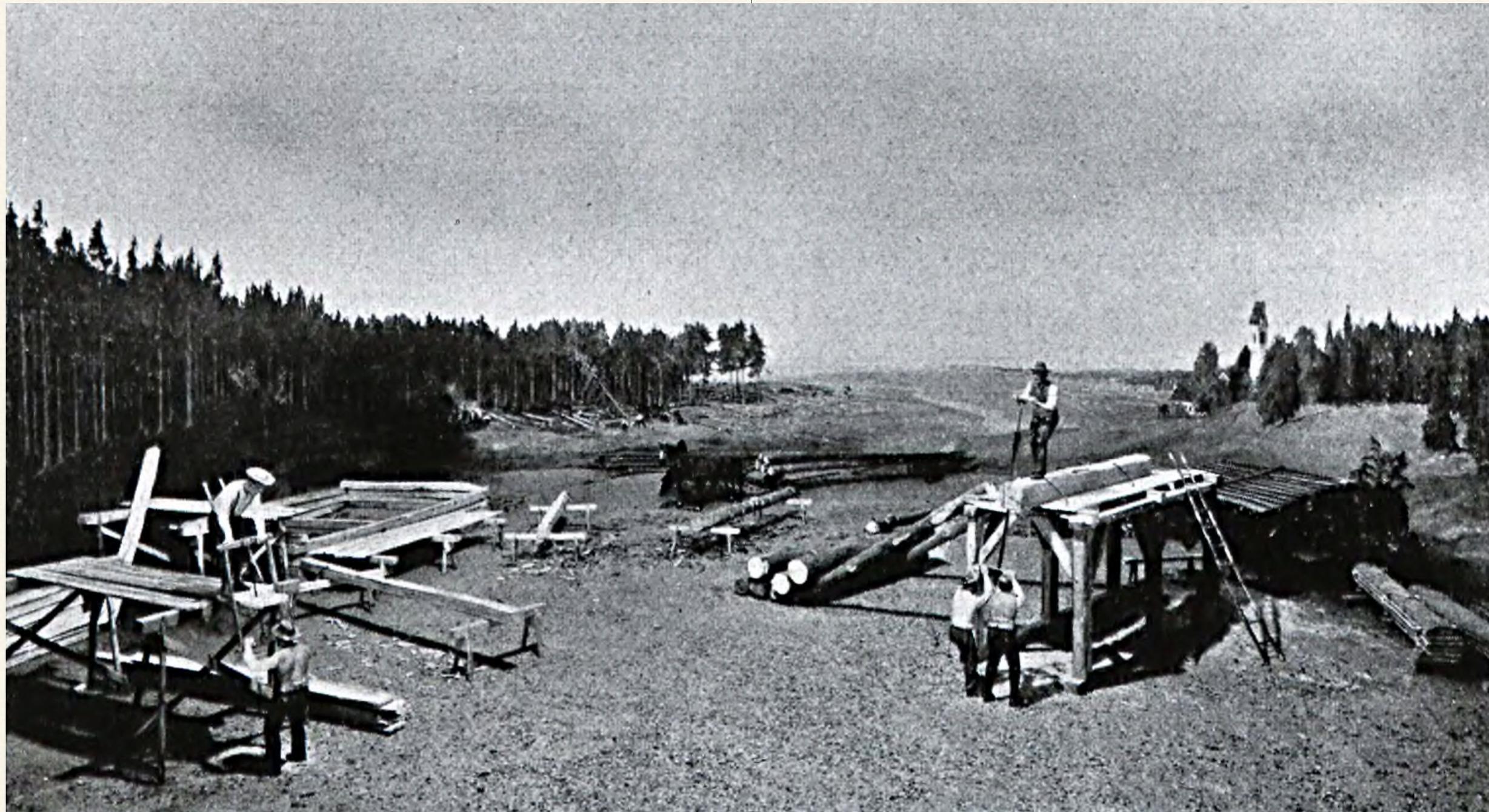
Uno dei principali problemi della parete a tronchi riguarda il ritiro non uniforme, causato

anche da carichi non uniformi. Per far fronte a tale problematica alcune soluzioni ideate consistevano nell'aumentare l'area di contatto tra i differenti tronchi tramite superfici orizzontali (assonometria 3, 14, 15) oppure, ancor meglio, tramite superfici spezzate (assonometria 13, 19, 20). Un'altra soluzione consisteva nell'inserimento della stoppa tra i giunti mediante il metodo “Kalfatern” (calafataggio), ossia la tecnica utilizzata anche in carpenteria navale per l'impermeabilizzazione dello scafo ligneo. In questo specifico caso, in Carinzia veniva ricavata una fessura tra i differenti giunti (assonometria 15), successivamente sigillata con muschio e intonaco di calce. Una soluzione simile era adottata anche nei paesi scandinavi, in particolare in Norvegia, con lana di pecora tinteggiata di rosso o blu. Interessante notare come l'industrializzazione degli inizi del XX secolo prendeva diversi spunti dalle soluzioni progettuali tradizionali citate precedentemente, ripensandole e in alcuni casi addirittura unendole: nell'assonometria 24 infatti viene rappresentata una soluzione industriale che prendeva spunto da una sezione utilizzata tradizionalmente dai paesi di lingua tedesca e vi inseriva all'interno una corda di canapa incatramata. Interessante l'esempio dell'assonometria 21: in questo caso infatti vengono introdotte l'utilizzo di strisce di legno chiodate alter-

nativamente verso l'alto e verso il basso per rafforzare la tenuta del giorno. Vi è da sottolineare il fatto che tale soluzione, pur non essendo prodotta in fabbrica industrialmente, è comunque figlia della seconda rivoluzione industriale: l'utilizzo di un quantitativo tale di chiodi era impensabile prima della produzione su larga scala; la chiodatura è sempre stata storicamente estremamente onerosa da un punto di vista dei costi e non è un caso che in tutti gli esempi citati precedentemente non ve ne è traccia. Un possibile antenato della chiodatura, che invece è stato utilizzato soprattutto nel caso di giunti e nelle intersezioni dei telai di porte e finestre, è il cuneo di legno, di cui si discuterà in maniera più approfondita nel successivo capitolo. Per rendere meglio l'idea di quali problemi possano portare ad un ritiro non uniforme, la figura 4 è esemplificativa: tale edificio, eretto agli inizi del XIX secolo nella regione della Slesia: per poter procurare rapidamente un'abitazione per gli esuli del Tirolo provenienti dalla valle Zillerthal non è stato possibile lasciar essiccare il legname come di consueto, prima dell'erezione dell'insediamento composto da diverse fattorie. Il risultato di tale inadempienza ha portato alla torsione dei tronchi a sezione rettangolare lungo l'asse longitudinale, oltre che una prematura fessurazione in direzione longitudinale radiale delle fibre.



Fig. 4 : Sporgenze di una casa di abitazione di Zillerthal, vicino a Hirschberg, in Slesia (Pbleps, 1942, p. 55).



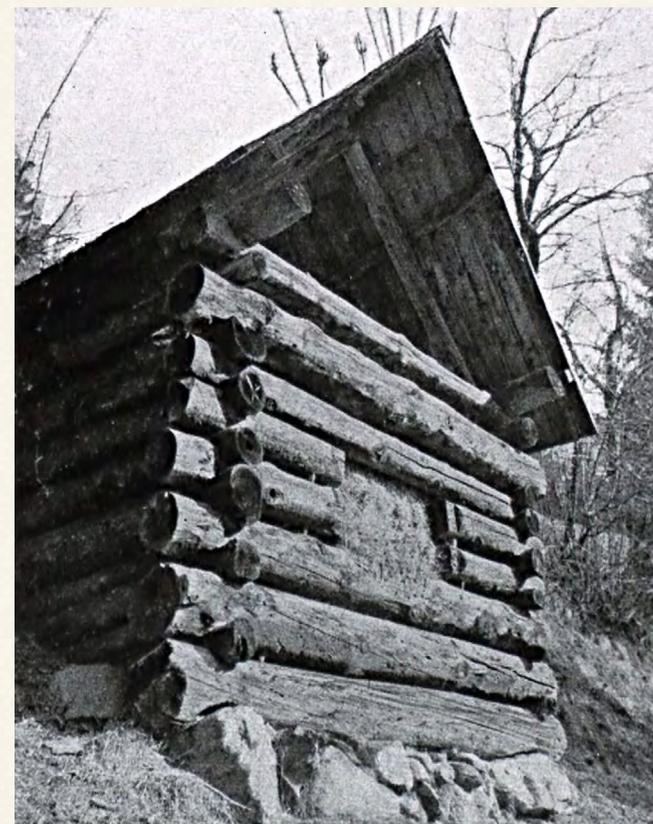
*Rappresentazione delle varie fasi di lavorazione del legno del "Deutsches Museum" di Monaco. Sullo sfondo, gli alberi vengono abbattuti; al centro, a sinistra, viene mostrata la rifilatura dei tronchi in tre fasi, a destra il taglio delle travi con una sega e a sinistra il taglio delle tavole con una sega a telaio. A destra, viene mostrato come il legno viene accatastato per consentirne la corretta essiccazione (Phleps, 1942, p. 43).*

## 1.2 Le connessioni lignee blockbau

Il settore della carpenteria riguardante gli incastri e le connessioni lignee è qualcosa di straordinariamente unico: il nodo è il catalizzatore della conoscenza profonda della materia legno, della maestranza tecnica dell'esecutore, ma soprattutto è espressione della genialità con cui il progettista risponde al problema statico. Il nodo è la risposta ad un problema di primo acchito curiosamente semplice, di carattere totalmente geometrico: ossia in quale maniera due oggetti si compenetrano. In termini più contemporanei, è una sorta di operazione booleana tra due solidi, nella quale però è l'ar-

chitetto, o costruttore, a decidere in quale maniera questi due solidi si uniscono. Al contrario delle operazioni booleane, infatti, la risposta non è matematicamente univoca, bensì è progettata grazie all'intuizione e alla creatività spaziale del progettista che, basandosi su una buona dose di precedenti secoli se non millenni di prove empiriche, riesce a produrre un sistema di interconnessione staticamente stabile e resistente non solo ai carichi applicati e alle forze esterne quali vento o terremoti, ma che riesca al tempo stesso a stabilizzare le deformazioni del legno nei successivi anni o decenni.

*Fig. 5: Fienile di Radenthein, in Carinzia, realizzato con legname rotondo cresciuto naturalmente. I tronchi sono tenuti in posizione mediante incisione su un lato negli angoli (Phleps, 1942, p. 50).*



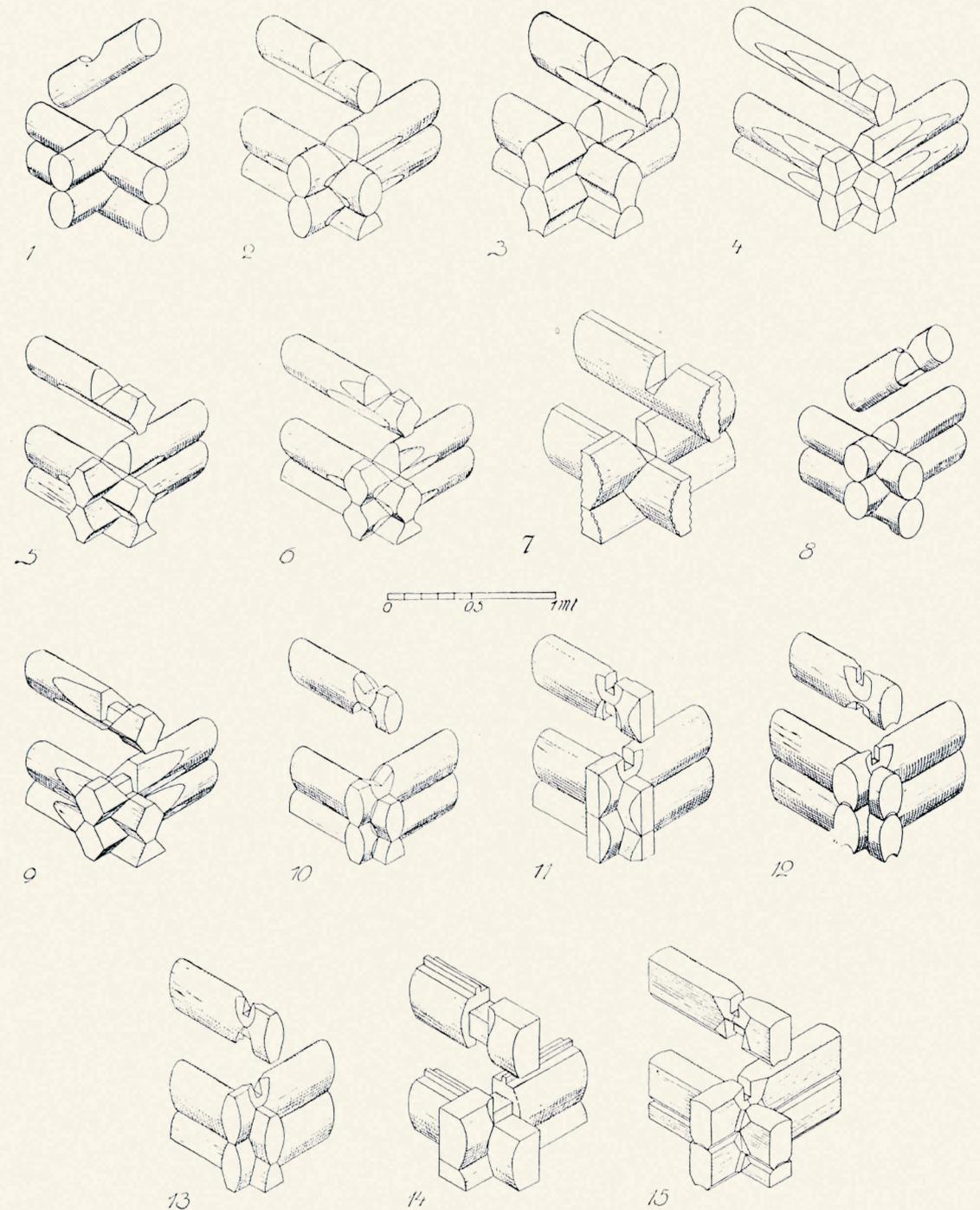
Dopo aver analizzato attentamente la connessione tra i differenti livelli della parete a blocchi, la conseguente necessità immediata è come connettere differenti pareti fra loro. Nella forma più arcaica, tale collegamento veniva attuato tramite l'incisione curva su un solo lato del tronco, permettendo l'alloggiamento del tronco successivo come mostrato in figura 5. Non esiste un termine univoco nella lingua italiana, in alcuni casi denominato "intaglio a culla" o "intaglio rotondo": nell'opera di Phelps viene indicato con il nome di "Verkämmer", mentre nella versione tradotta da Roger MacGregor con un più generico "round notching".

Nella figura 6 si possono notare i vari gradi di innovazione succedutisi nel corso dei secoli; L'evoluzione successiva del Verkämmer fu il Verschränkung (nodo a incastro, o lock notching), il quale differiva dalla precedente soluzione dal fatto che l'intaglio non fosse più curvilineo - dunque assecondando la sezione del

tronco - e che soprattutto vi fosse un intaglio anche nella parte inferiore del blocco per una più salda connessione tra i differenti blocchi. Per facilitare lo scortecciamento e la realizzazione delle incisioni dei nodi vennero date alle teste dei tronchi delle forme differenti dalla sezione originaria circolare, come nelle assonometrie 2, 4, 5, 6 e 9. Tali esempi, provenienti dalla Svezia, mostrano i successivi progressi della tecnica e dell'immaginazione, stimolati dall'uso dei differenti strumenti disponibili all'epoca, ossia l'ascia, il coltello da disegno e lo scalpello. Definite da Phelps le soluzioni svedesi con "una tendenza al pittoresco", in quanto si preoccupavano di una ricercata decorazione della testa del tronco - ma che di fatto mantenevano il medesimo incastro a sezione trapezoidale tra i due elementi - si contrapponevano agli incastri lignei norvegesi (assonometria da 10 a 13 e 15), i quali invece si preoccupavano in maniera minore dell'estetica risultante e concentravano invece l'attenzione nel perfezionare il legame stesso del giunto.

"Bei ihnen in der Regel mit ovalem Querschnitt versehenen, gleich gespannten Muskeln wirkenden Blockbalken hätten solche Endigungen, wie sie die Schweden liebten, kleinlich gewirkt."  
(Phelps, 1942, p. 57)

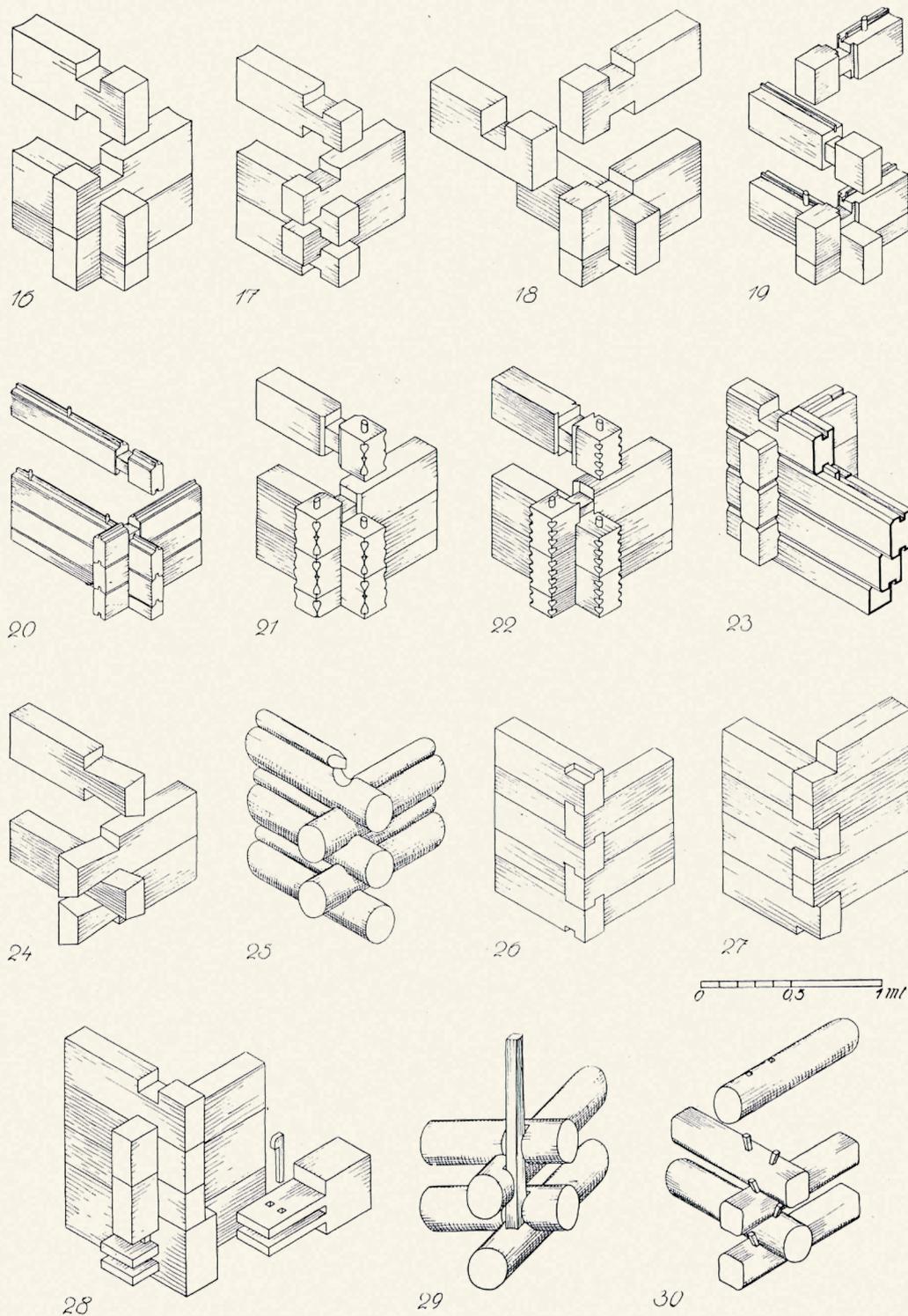
"Il tipo di trattamento delle estremità tanto caro agli svedesi sarebbe apparso pignolo sui tronchi norvegesi, spesso ovalizzati."



Verschränkung // Lock Notching // Nodo a Incastro

Fig. 6: Incastri lignei angolari mediante intaglio rotondo e nodi a incastro (Phelps 1942, p. 57)

- No specifica regione | 1
- Svezia | 2
- Lituania | 3
- Svezia | 4
- Svezia | 5
- Svezia | 6
- Svizzera | 7
- No data | 8
- Svezia | 9
- Norvegia | 10
- Norvegia | 11
- Norvegia | 12
- Svizzera | 14
- Norvegia | 15



Verkämmen // Locking Shoulder // Bloccaggio a Spalla

Fig. 7: Incastri lignei angolari mediante bloccaggio a spalla (Phelps 1942, p. 58)

- No specifica regione | 16
- Svezia | 17
- Lituania | 18
- Svezia | 19
- Svezia | 20
- Svezia | 21
- Svizzera | 22
- No data | 23
- Svezia | 24
- Norvegia | 25
- Norvegia | 26
- Norvegia | 27
- Svizzera | 28
- Norvegia | 29
- Norvegia | 30

La figura 6 rappresenta comunque, nelle differenti forme più o meno decorate o ricercate, variazioni del medesimo incastro: tale sistema di nodi, infatti, aveva come base sempre la sezione originaria del tronco, talvolta smussata ad ovale come nel caso norvegese, altre volte utilizzando solamente il mezzo tronco (come nell'assonometria 7, proveniente dalla Svizzera) o decorando l'estremità di quest'ultimo. Di fatto si trattava sempre dell'archetipo del tronco - con delle scanalature al suo interno - i quali nella congiuntura dell'angolo formavano tramite le estremità sporgenti queste sorte di "lesene" di legno.

La successiva evoluzione è mostrata nella figura 7: in questo caso la sbazzatura più primitiva e manuale del tronco fatta con l'accetta e il coltello da disegno lascia spazio all'utilizzo della sega, cominciando a produrre sezioni del tronco rettangoli e con le connessioni a incastro a 90 gradi, pur mantenendo - nello specifico nelle prime 8 assometrie, dalla 16 alla 23 - ancora l'archetipo della testa del tronco uscente dall'angolo. Al contrario dei precedenti sistemi costruttivi mostrati nella figura 6, basati sulla sezione rotonda naturale del tronco, le soluzioni a sezione rettangolare presentavano lo spiccato problema della torsione del legno nelle estremità del tronco, come già mostrato nella

precedente figura 4, oltre che un più accentuato problema del ritiro del legno come evidenziato nelle figure 8 e 9. Tale problematica era evidente nei primi sistemi costruttivi a sezione rettangolare più antichi, rappresentati nelle assometrie da 16 a 18 e 23. Per far fronte a questa problematica, la prima soluzione fu quella di aggiungere un cosiddetto "Verkämmen" ("Locking shoulder", bloccaggio a spalla), il quale prevedeva l'intaglio di un offset per un ulteriore fissaggio della testa del tronco dal possibile ritiro, come mostrato nelle assometrie dalla 19 alla 22; una ulteriore soluzione che poteva essere applicata per ottenere una serrata connessione prevedeva l'utilizzo di chiodi di legno nelle teste del tronco (assometria 21 e 22).

Il grado di innovazione dei nodi a incastro arrivò ben presto a saturazione: le tecniche e conoscenze dell'epoca avevano indagato approfonditamente le molteplici varianti di connessioni con intagli a 90 gradi tale per cui non vi fossero realmente nuove intuizioni tecnologiche, se non a livello decorativo. Nel corso del tempo, la minuziosa lavorazione degli angoli a incastro indagata in tutto il territorio europeo cominciò a perdere di interesse in risposta a una nuova estetica dell'angolo, denominata da Phelps "Verblatten", tradotta in "lapped corners" (ossia angoli raccordati); come mostrato nella

figura 10, con gli angoli raccordati si rimuovono le teste terminali dei tronchi e si termina la costruzione con il giunto ligneo, perdendo le lesene di legno angolari che sono sempre state presenti sin dal primo archetipo dell'architettura blockbau. Secondo Phleps questa nuova tendenza nasceva da una volontà di emulazione delle pareti lisce delle costruzioni in muratura; a onor del vero, l'architetto tedesco ha più volte rimarcato nella sua opera il suo personale fastidio riguardo l'attitudine - da parte dei costruttori e carpentieri - di provare a mimare le opere in muratura nelle costruzioni in legno, specialmente nelle decorazioni superficiali.

Nelle assonometrie 31 e 32 della figura 10 sono rappresentate le due soluzioni più semplici da realizzare per un angolo raccordato, ossia con un incastro ad angoli retti e senza sporgenze di alcun tipo. La prima assonometria connetteva solamente due tronchi allo stesso livello, e per tale motivo la naturale evoluzione di tale sistema era l'assonometria successiva, la quale permetteva di connettere i vari livelli di tronchi ad altezze differenti. La problematica principale di questi iniziali soluzioni riguardava il fatto che necessitassero di chiodi di legno per evitare lo spostamento dei tronchi verso l'esterno, i quali però erano particolarmente suscettibili a forze di taglio, oltre che particolarmente

complicati per la messa in opera.

Questa serie di problematiche ha portato all'ideazione del nodo ligneo per eccellenza, il principe delle connessioni che tutt'oggi è ancora utilizzato - con le dovute evoluzioni ed accortezze - nell'ambito architettonico, ingegneristico ed industriale (come nel caso del product design). Denominato nello stato federale Vorarlberg in Austria con il termine di "Weyaschwanz-Strick", per la somiglianza con la coda del gheppio (Weyhe), e nella lingua anglosassone con il termine "dovetail", associandolo invece questa volta alla coda della colomba, è noto nella lingua italiana con nodo a coda di rondine. La sensazionalità di questo sistema è che, al contrario delle assonometrie 31 e 32 precedentemente analizzate, non richiede l'utilizzo di chiodi di legno di alcun tipo. Non solo: rispetto ai sistemi di nodi a incastro analizzati nella figura 6 e ai nodi con bloccaggio a spalla esaminati nella figura 7, la coda di rondine richiede un quantitativo di intagli ben inferiore per essere realizzata, permettendo di ottenere un angolo perfettamente liscio e raccordato senza lesene esterne.

La genialità del sistema risiede anche nel fatto che, al contrario di tutti i sistemi di connessione analizzati sino ad ora, la coda di rondine abbandona l'idea

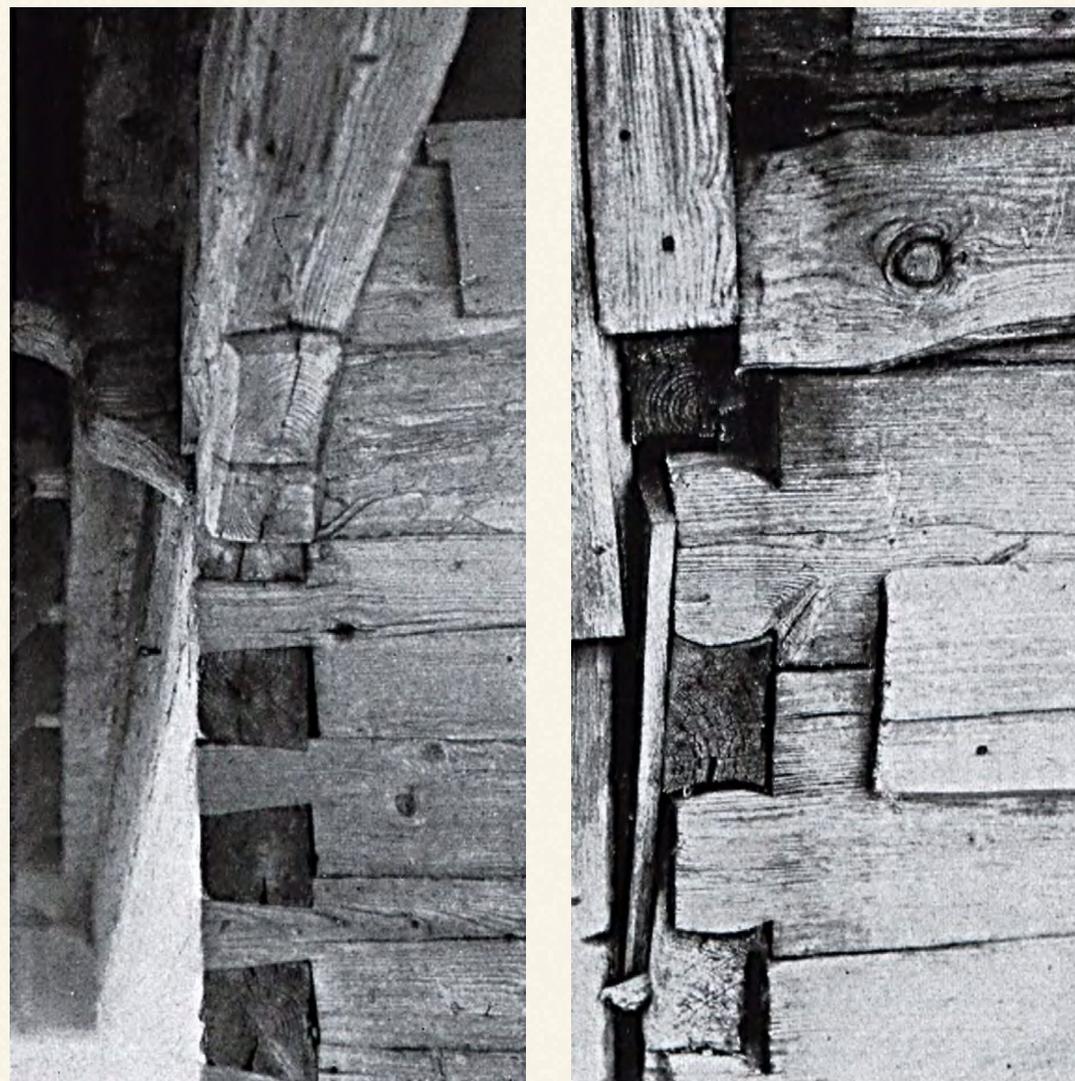
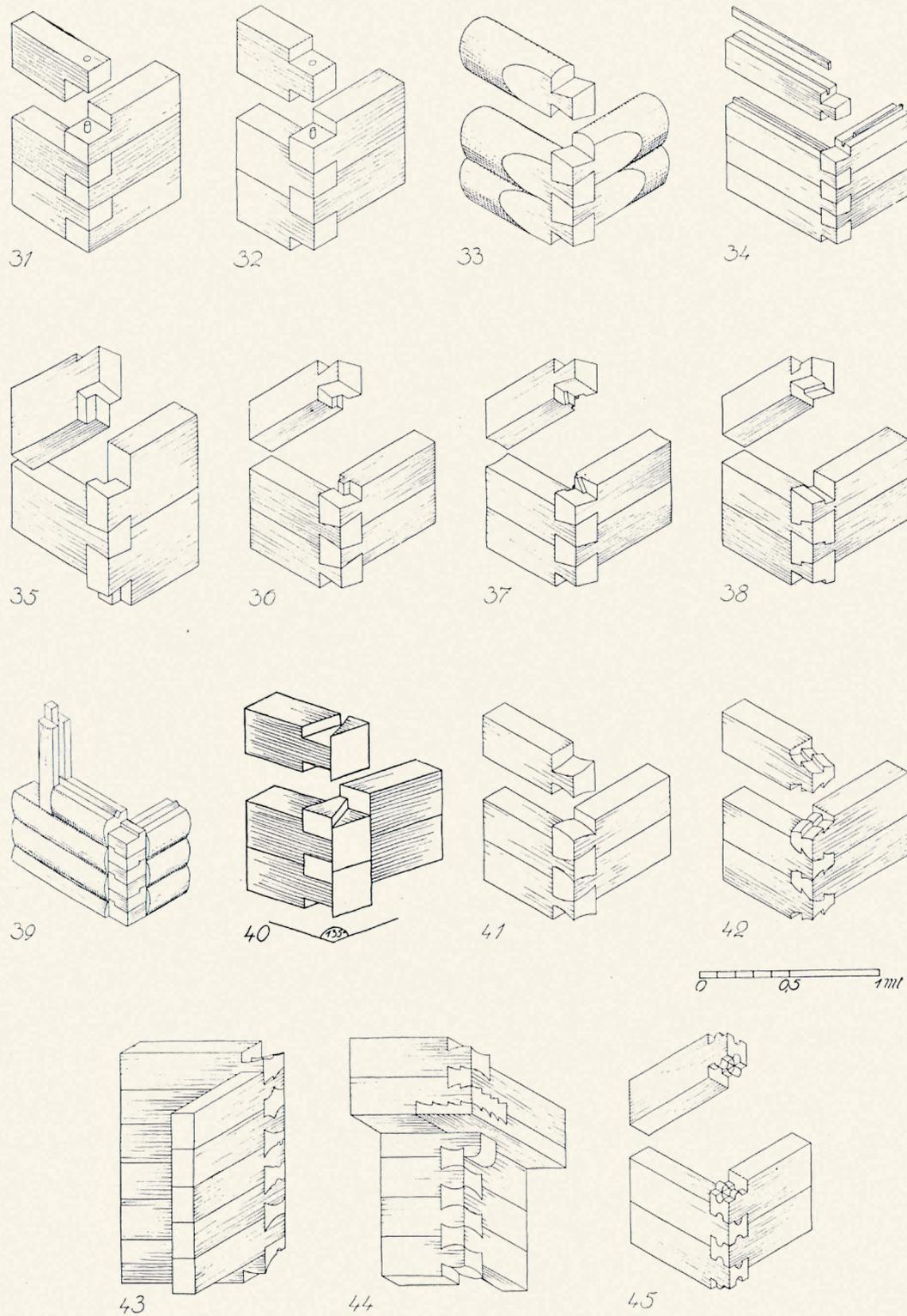


Fig. 8 e 9: incastri lignei angolari con code di rondine diritte o curve presso Niedermeuching (1581) e Erding (1600 circa), Alta Baviera. Nel primo caso, le travi del tronco sono tagliate dal nucleo, mentre nel secondo, oltre alla stessa forma, ci sono anche mezzi tralicci con una fessura che tocca il midollo. Entrambi danno l'idea di come l'ambiente possa far soffrire il legno in base alla specifica lavorazione svolta (Phleps, 1942, p. 61).



Verblatten und Verzinken // Lapped and Dovetail // Raccordature e Code di Rondine

dell'utilizzo di piani ortogonali per la progettazione del nodo e si affida invece a piani inclinati: grazie a questa soluzione, questa connessione lignea permette l'appoggio dei tronchi senza il pericolo che questi ultimi si spostino verso l'esterno, grazie alla presenza dei piani inclinati, e dunque rendendo superfluo l'utilizzo dei chiodi, facilitando al tempo stesso la messa in opera.

Un particolare e interessante esempio che fa da ponte dalla precedente concezione degli angoli lignei con le lesene e l'utilizzo della coda di rondine è presente nell'assonometria 24 nella figura 7: in questo caso, unico nel suo genere, la coda di rondine viene utilizzata come sistema di connessione, pur mantenendo ancora l'immagine originaria del tradizionale angolo ligneo tramite il prolungamento del nodo verso l'esterno. Il sistema a coda di rondine si può ammirare nelle sue varie forme nella figura 10, a partire dall'assonometria 33, ossia la versione più arcaica ancora con la sezione tonda del tronco. Le tecniche successive, dalla 35 alla 38, propongono delle ulteriori scalanature: questi dettagli permettevano non solo di contrastare in maniera ancor più efficace il ritiro e la deformazione non uniforme dei tronchi durante l'assestamento, ma permetteva al tempo stesso anche di ridurre le correnti d'aria, dato che il nodo dell'angolo era l'elemento più sog-

getto alla creazione di fessurazioni e spiragli.

Il genio degli artigiani e dei carpentieri portò alla creazione di nodi a coda di rondine con superfici curvilinee, con o senza l'aggiunta di possibile scalanature, come mostrato nelle assonometrie dalla 41 alla 44. Il grado di abilità tecnica nella realizzazione di queste connessioni è forse il più alto mai raggiunto nell'architettura tradizionale lignea europea: non è un caso che Phelps definisce queste connessioni "Stolz des Zimmermanns", ossia l'orgoglio dei carpentieri.

Per comprendere meglio il grado di manodopera necessario per la realizzazione di tali giunti, basti pensare che nella Carinzia degli inizi del XX secolo – dunque una delle regioni con la migliore manodopera presente su suolo europeo – una squadra di 4 carpentieri poteva completare in una giornata solamente due corsi di tronchi di una pianta quadrata di lato 5 metri.

Fig. 10: Incastri lignei angolari raccordati e a coda di rondine (Phelps 1942, p. 59)

- No data | 31
- No data | 32
- Lituania | 33
- Incastro Moderno | 34
- Danzica | 35
- Svizzera | 36
- Svezia | 37
- Norvegia | 38
- Carpazi settentrionali | 39
- No data | 40
- Paesi Alpini Orientali | 41
- Paesi Alpini Orientali | 42
- Paesi Alpini Orientali | 43
- Paesi Alpini Orientali | 44
- Alta Baviera | 45

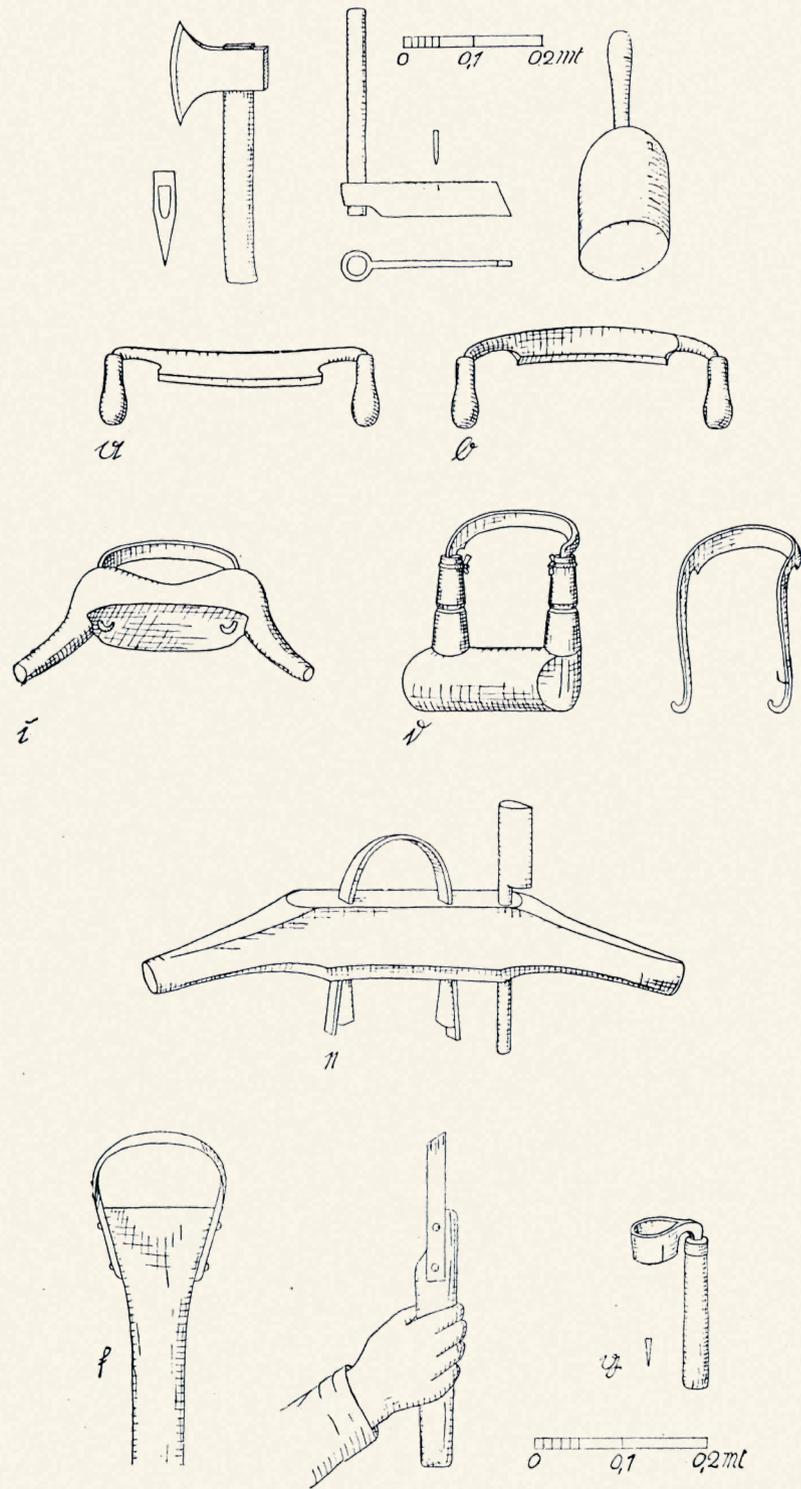
La ricerca svolta da Hermann Phelps non si limitò alla descrizione degli incastri lignei: il sensazionale lavoro di questa sua opera, infatti, va ad analizzare in maniera estremamente scrupolosa ogni singolo dettaglio dell'edificio architettonico, dal basamento sino alla copertura del tetto. Il libro scritto non era infatti indirizzato ad una tipica descrizione "romantica" dell'architettura vernacolare alpina – visione tipica degli scritti degli anni precedenti che si limitavano a promuovere un'idea romanticizzata e pittoresca dei paesaggi rurali alpini senza scendere nei dettagli tecnico costruttivi – ma era volto invece, dichiarato dalle stesse parole di Phelps nell'introduzione, a tutti gli architetti e falegnami dell'epoca come un vero e proprio manuale la comprensione da un punto di vista teorico, tecnico e produttivo come potesse essere progettata a regola d'arte una architettura lignea europea. "Holzbaukunst der

Blockbau" è un'opera che spazia dalla scelta della specie di legno sino all'analisi di ogni singolo strumento necessario per il corretto intaglio del tronco.

In questo capitolo è stata riportata in maniera sistematica l'evoluzione e la variazione delle connessioni lignee delle pareti – in quanto le più rappresentative ed utili al fine di questo tema di ricerca – ma è da sottolineare il fatto che moltissimi altri tipi di connessioni estremamente stimolanti da un punto di vista geometrico e progettuale vennero descritti ed analizzati dal professor Phelps, di fatto meritevoli anch'essi di attenzione per la sollecitazione della mente degli architetti. Nelle figure successive verranno dunque riportate ulteriori incastri lignei studiati da Phelps, oltre che riportare fotografie dell'epoca di ciò che era il risultato dello spesso citato "orgoglio dei carpentieri": l'architettura lignea.



*Stabur di Telemarken. (Fotografia di Neupert, Oslo) Un esempio caratteristico dell'ampia applicazione dei profili a frangia, che si estendono anche alla venatura finale. (Phleps 1942, p. 305)*



Attrezzi da spacco della Foresta Nera:  
 1. Ascia da spacco.  
 2. Coltello da taglio o da decapaggio  
 3. Mazzuolo  
 4. (sotto) relativi utensili in legno provenienti dalla Scandinavia (c, d, e, f) e dalla Svizzera (g) (Pheps 1942, p. 7)

(A destra)  
 Processo di lavorazione e strumenti utilizzati per la produzione di scandole (Pheps 1942, 96).

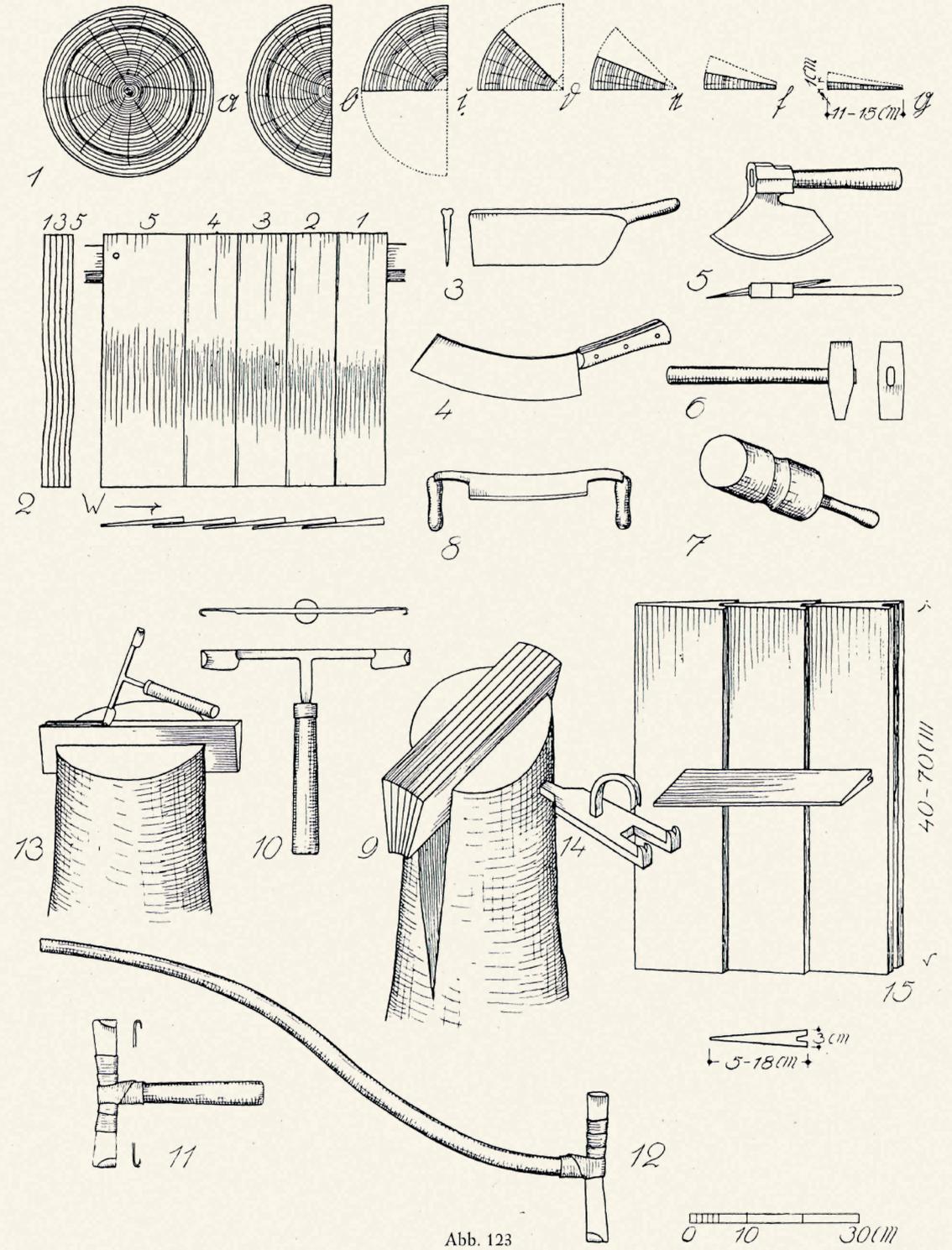
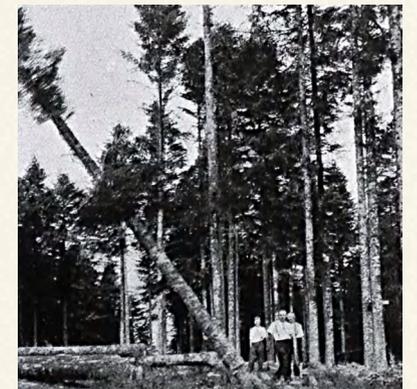
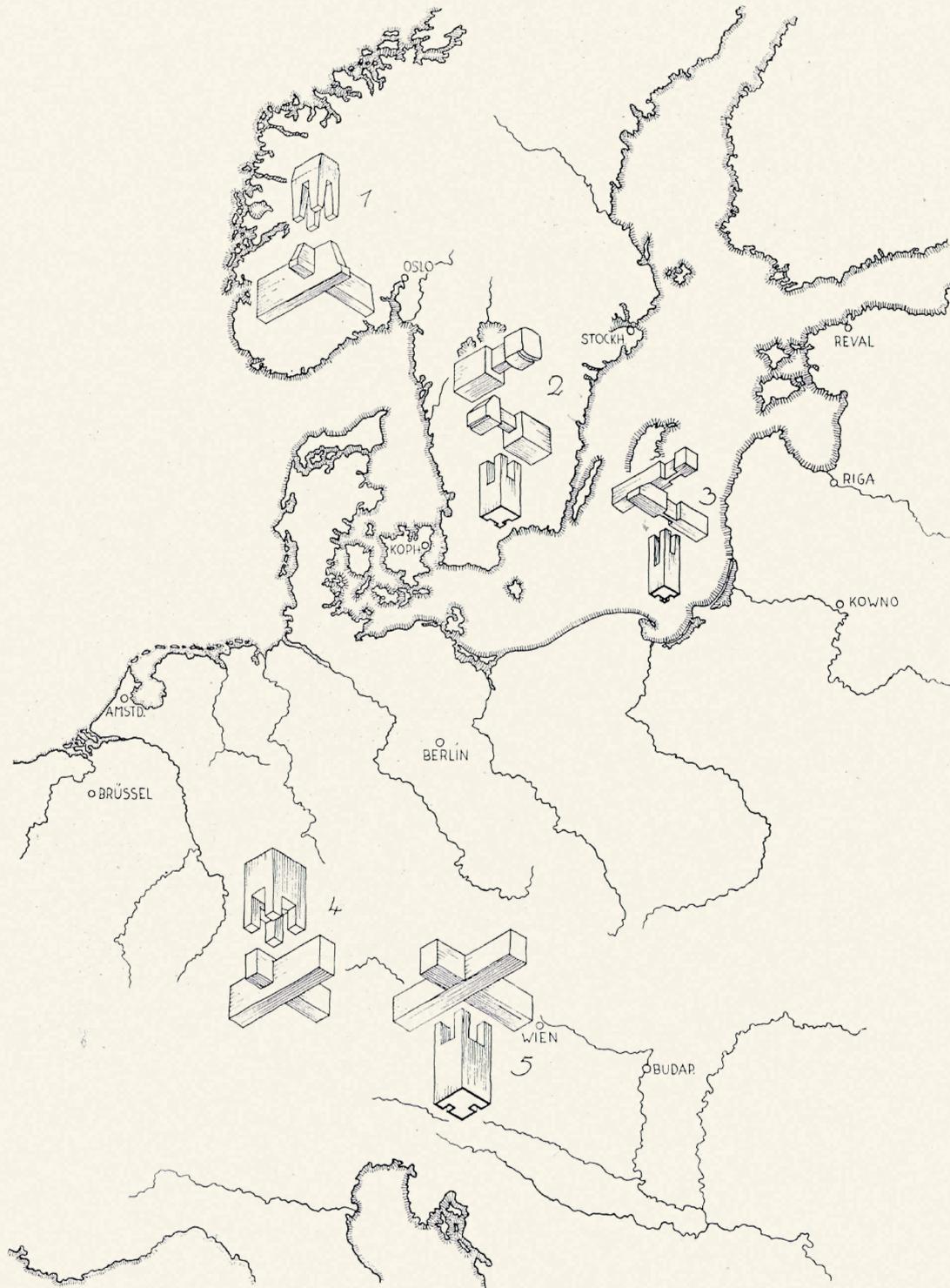


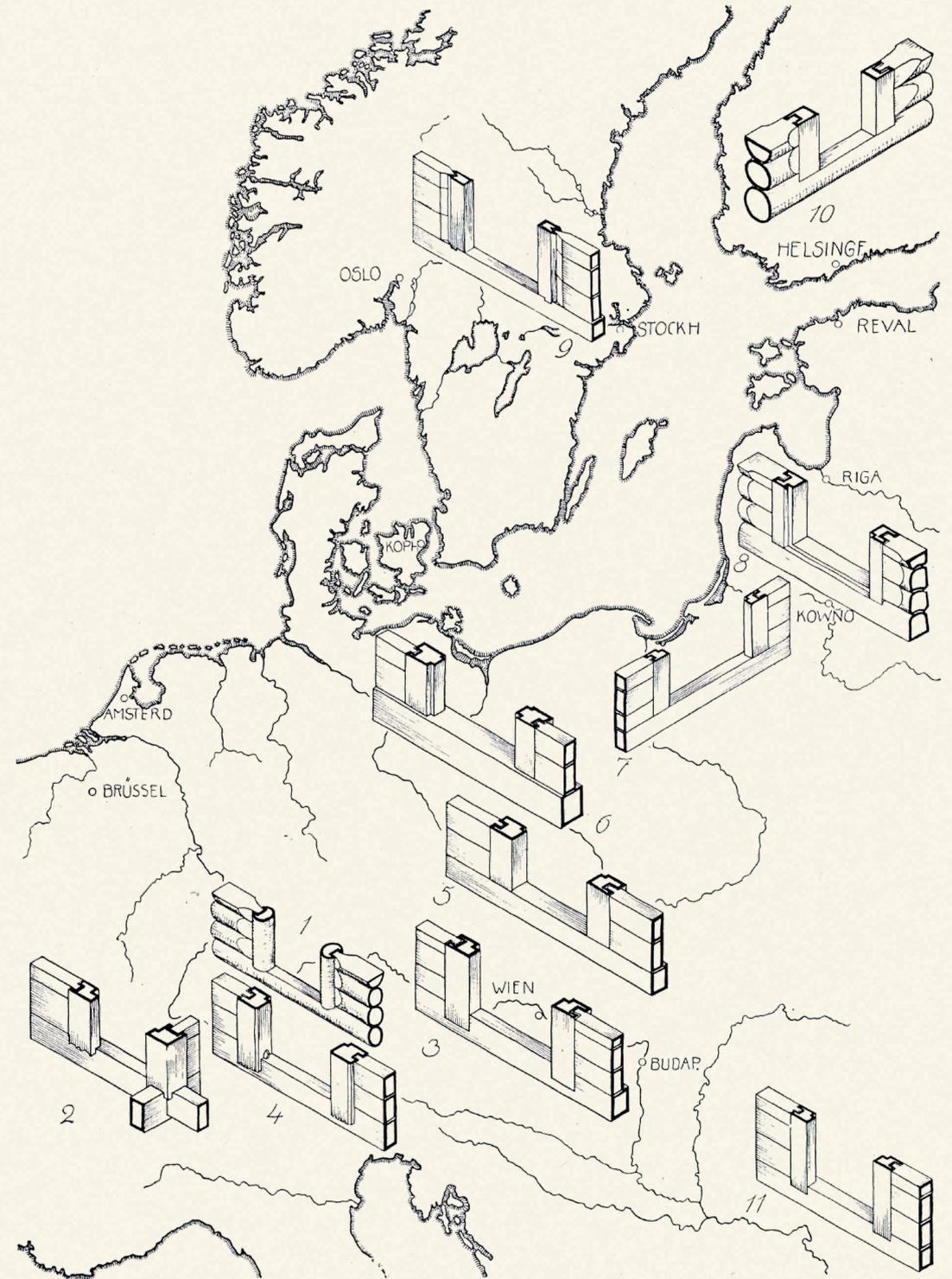
Abb. 123



Sequenza di lavoro per l'abbattimento di un albero nella foresta di Schwarzwald. Fig. 1: La corteccia viene rimossa appena sopra il terreno, in modo che i granelli di sabbia sollevati dalla pioggia non possano danneggiare la sega. Fig. 2: Con la sega trasversale il taglio viene iniziato in direzione opposta alla direzione di caduta. Fig. 3: per evitare che la lama della sega si inceppi, si inseriscono nel giunto dei cunei a forma di scalpello. Fig. 4: con l'ascia si pratica un intaglio sul lato di caduta. Fig. 5: l'albero viene sbilanciato inserendo gli scalpelli, che agiscono come cunei. Fig. 6: l'albero cede in direzione dell'intaglio e cade a terra. (Phleps 1942, p. 38-40)



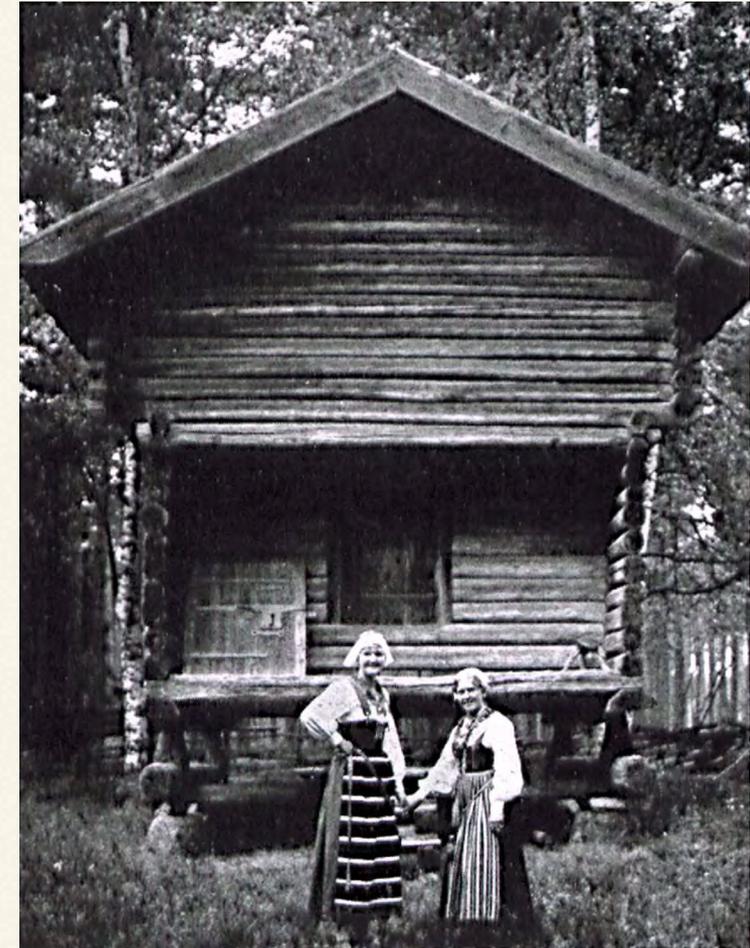
Diffusione della forma rovesciata che ha avuto origine nella costruzione di telai nordici e nella lavorazione del riso ed è stata trasferita anche alla costruzione blockbau (Phleps 1942, p. 171)



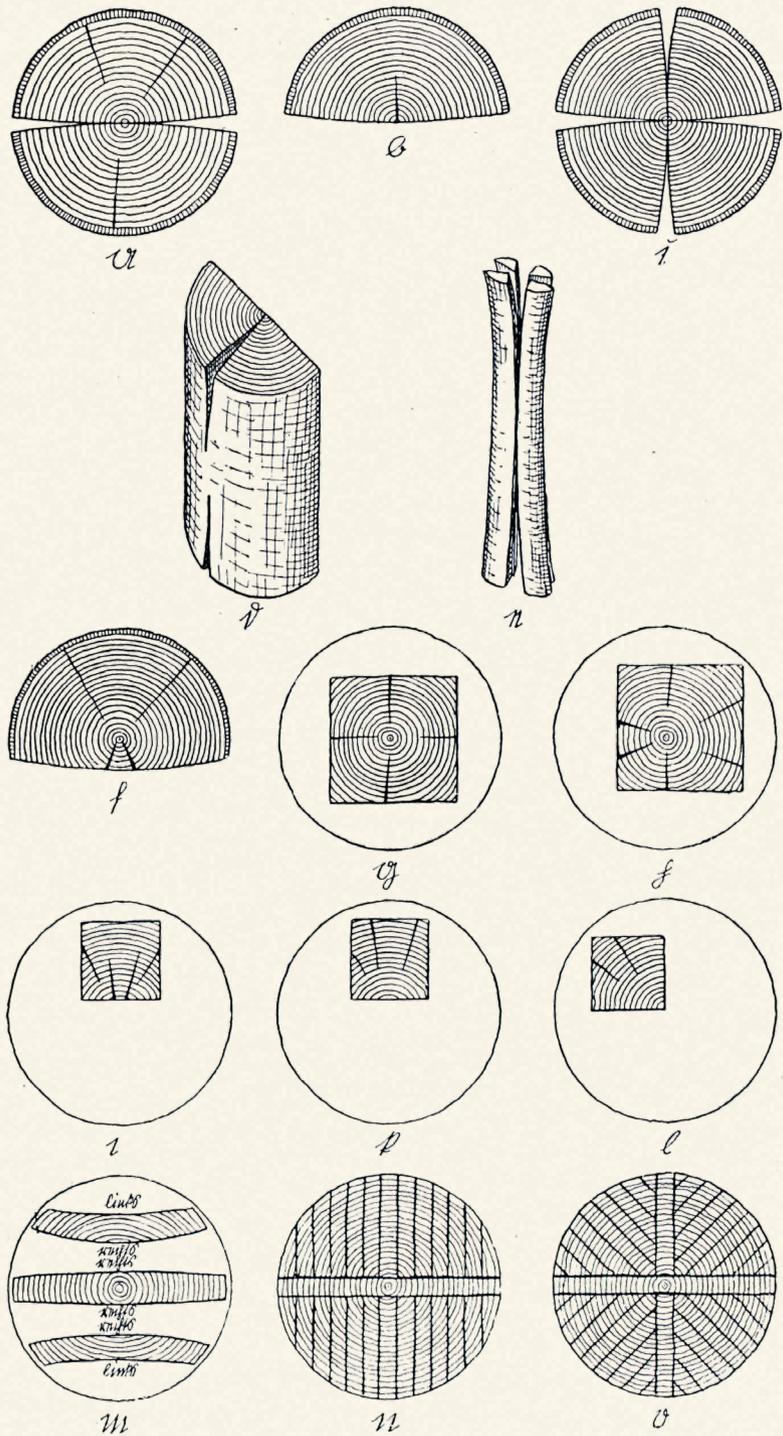
Diffusione della struttura della porta celtica. Il termine "celtica" è stato scelto perché questa struttura è originaria delle antiche aree di insediamento dei Celti, ma può essere fatta risalire attraverso il periodo celtico all'età del bronzo. (Phleps 1942, p. 176)



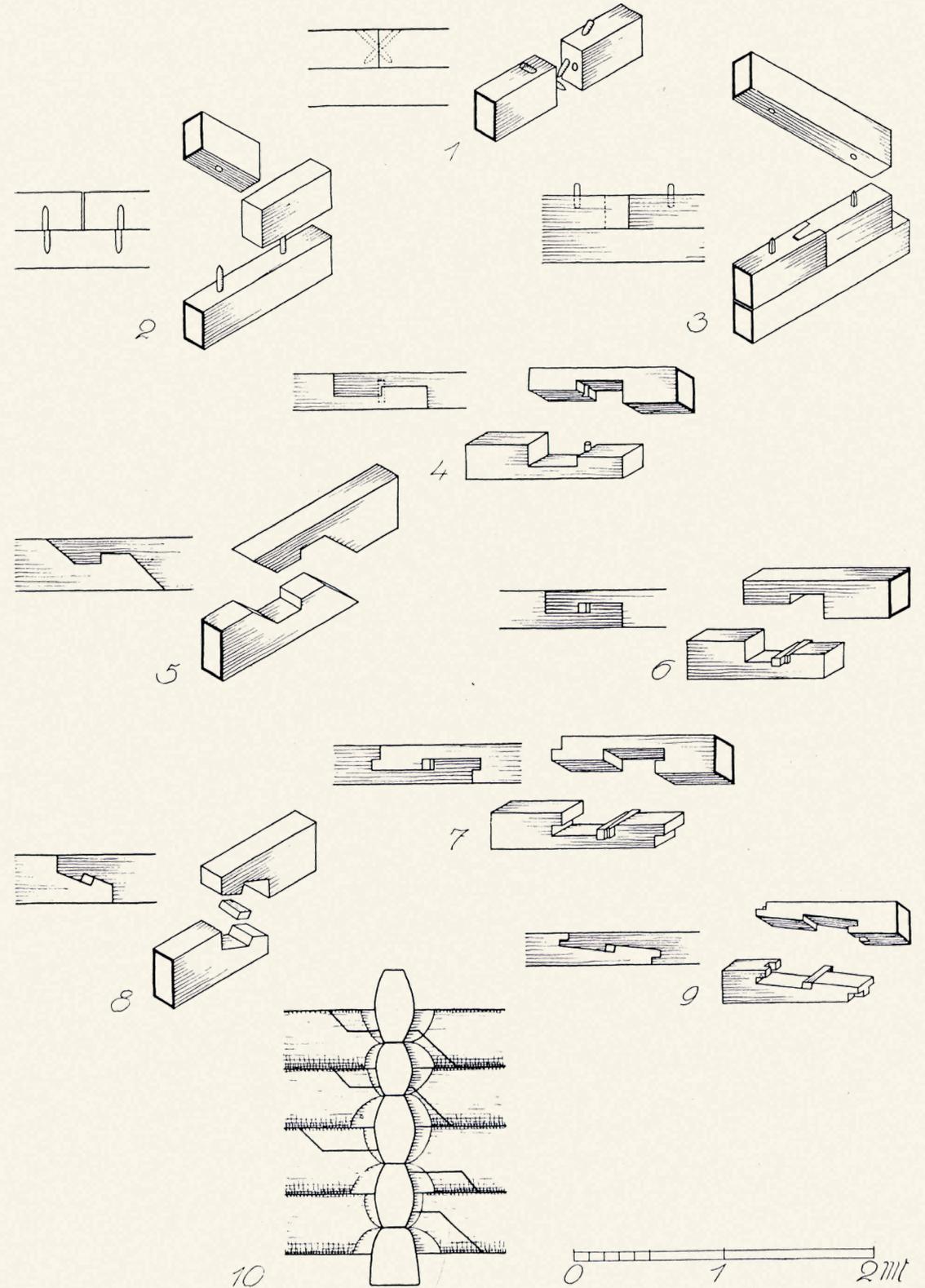
Chiesa a doghe di Bor- gund, Norvegia, della metà del XII secolo. Ad eccezione della galleria inferiore (sval), l'edificio è stato coperto e rivestito interamente con tavole inchiodate su una base di tavole. Al colmo, lo strato di scandole è protetto da una cresta di colmo (busto), decorata con ornamenti spezzati e teste di drago, che risalgono a una ristrutturazione del 1738. (Phleps 1942, p. 105)



Granaio a piani di Dalarne. Si nota la sporgenza del piano superiore. (Phleps 1942, p. 302)

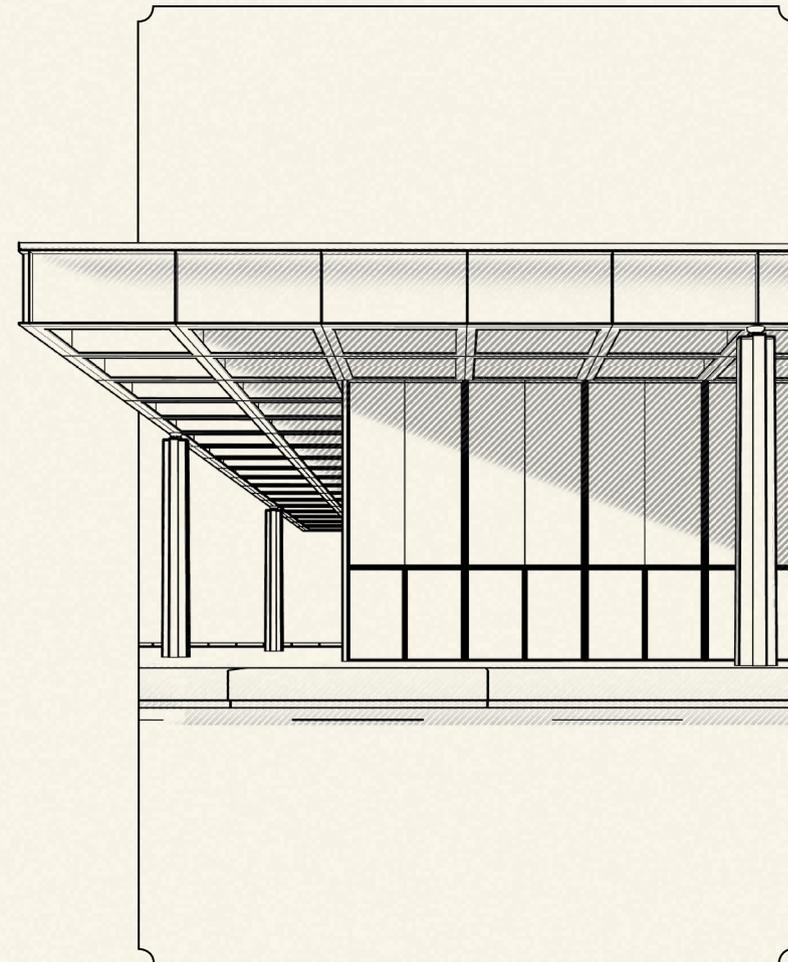


(sopra) Illustrazione della fessurazione di legni rotondi e quadrati causata dal sollevamento del vento e dalla deformazione delle tavole. (Phleps 1942, p. 36)  
 (a destra) Tipologie di incastri per l'unione delle teste di travi. (Phleps 1942, p. 70)



- Capitolo II -

## LA SCALABILITÀ DELL'AUTOMAZIONE



## 2.1 La meccanizzazione del prodotto

Si potrebbe riassumere il precedente capitolo con la sola frase “l'orgoglio del carpentiere”. L'evoluzione delle tecniche costruttive dell'architettura lignea, infatti, non riguardava solamente una mera questione tecnico-statica, ma evidenziava come col passare dei secoli le maestranze di tutta Europa avessero il bisogno intrinseco di progettare un edificio a regola d'arte. I livelli di complessità raggiunti in certe connessioni lignee non riguardavano più solamente l'ottenimento un giunto staticamente stabile, ma sottolineavano la necessità di firmare l'architettura prodotta, evidenziando la virtuosità del carpentiere. Lo stesso Phleps afferma, riferendosi ad alcuni incastri parete, come essi “rappresentino quanto di più audace l'arte della lavorazione del legno abbia prodotto”.

*“Kühnste darstellt, was die  
Holzbaukunst hervorgebracht hat.”  
(Phleps, 1942, p.64)*

E' da sottolineare il fatto che comunque in questa affermazione chiaramente non ci si riferisce alla lavorazione lignea relegata esclusivamente alla figurazione - come l'arte statuaria - in quanto tale mondo si interessa quasi esclusivamente dell'espressione estetica e non delle questioni statico-mecchaniche. Le connessioni progettate a cui si riferiva Phleps, nella figura 11, non necessitavano di adottare forme di lettere, attrezzi manuali o silhouette di chiese, ed anzi tali figure erano chiaramente controproducenti a livello strutturale; eppure il talento dell'artigiano non solo riusciva a rendere staticamente stabile la porzione più delicata dell'edificio, ma era in grado persino a firmare tale connessione, unendo la tecnica, la statica e un certo senso anche un timido accenno all'arte figurativa.

In un certo senso le tecniche di connessione analizzate sono una sorta di trasposizione architettonica della firma personale: la firma non è altro che la trascrizione del movimento dei nostri muscoli e tendini, e in quanto tale questi movimenti organici sono di fatto unici. Si può provare a tracciare una linea uguale ad un'altra linea tracciata precedentemente, ma al massimo essa potrà essere simile, ma non identica. Questo perché chiaramente il corpo umano non è progettato per la riproposizione di movimenti identici, al contrario invece di una macchina. E come

ogni firma è personale e unica nel suo genere, in quanto espressione di un unico corpo umano e di una unica mente, anche il giunto ligneo è espressione materiale di uno specifico carpentiere.

Analizzare i virtuosismi dei carpentieri e degli artigiani, in chiave quasi artistica, ha in qualche modo una certa fascinazione scientifica, quasi romantica, che al tempo stesso pare però estremamente distante rispetto alla realtà di oggi, sottendendo una certa sensazione di anacronistica nostalgia. E' lapalissiano ma necessario sottolineare il fatto che chiaramente negli ultimi 200 anni il modo di progettare e costruire è stato completamente stravolto dalla seconda rivoluzione industriale, non solamente grazie all'ideazione di nuovi materiali da costruzione - come il calcestruzzo o le leghe ferrose quali ghisa o acciaio - ma soprattutto per merito dei nuovi processi produttivi che hanno permesso di abbattere costi di produzione dei componenti architettonici.

In questo capitolo l'interesse principale non riguarda nello specifico i processi produttivi che hanno rivoluzionato i modi di produrre travi, mattoni o pilastri, ma più il significato economico e sociale che vi sta alla base: a onor del vero tale discorso non inizia neppure nel periodo della seconda rivoluzione medievale, ma durante il Rinascimento.

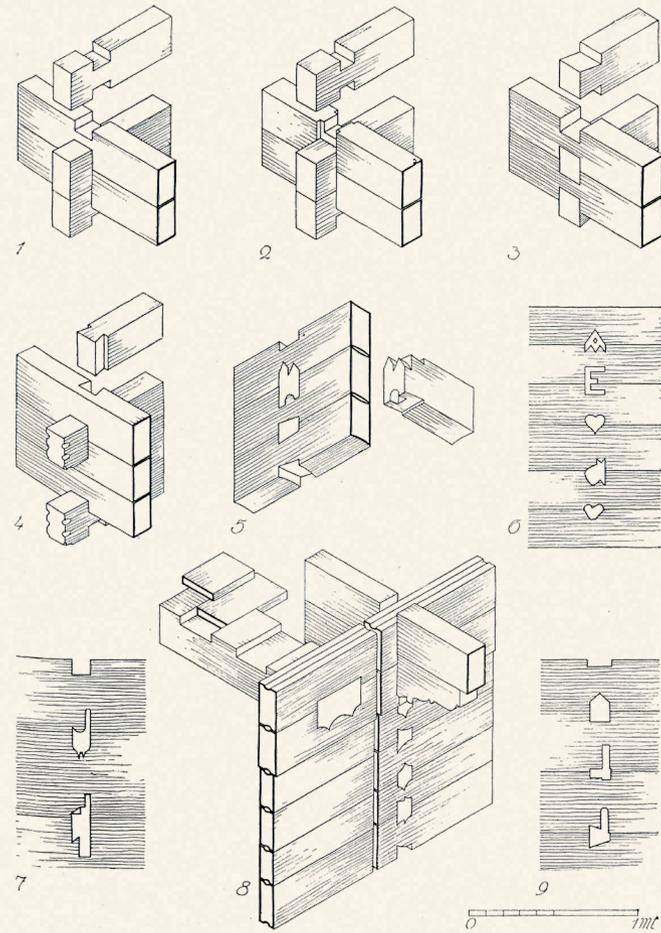


Fig. 11: Giunzioni di pareti intermedie mediante incastro, bloccaggio a spalle e coda di rondine. Le assonometrie da 5 a 8 testimoniano la viva ambizione artigiana dei tempi passati, unita ad un approccio amorevole al lavoro. Non ci si accontentava di ottenere sollo una connessione salda, ma si sfruttava la venatura finale che spiccava in modo evidente rispetto al legno longitudinale, ottenendo effetti ornamentali finemente strutturali. Negli esempi 6 e 7 ci si perde in forme che sembrano troppo artificiali (Phleps, 1942, p. 65).

Lo storico e critico dell'architettura Mario Carpo, professore presso la Berlett School of Architecture della UCL, traccia le radici concettuali della rivoluzione industriale ad un passato ancor precedente alla scoperta del Nuovo Mondo, ossia con l'invenzione della stampa a caratteri mobili di Johannes Gutenberg. Precedentemente all'invenzione dell'orafo tedesco, i "manu scriptus" erano appunto scritti a mano: la trasmissione scritta dei precedenti 5.000 anni era sempre stata prodotta da uno scriba che – similmente al carpentiere – produceva oggetti unici per merito del suo talento e delle sue conoscenze, in questo caso in termini di grafia e letteratura. Di fatto però il lavoro dello scriba consisteva in una serie di operazioni ben delineate: la riproduzione di un numero estremamente limitato di simboli (le lettere dell'alfabeto) e secondo un ordine preciso (la composizione delle parole). Ventisei segni grafici permettono virtualmente di esprimere ogni pensiero umano passato e futuro grazie al concetto che due secoli più tardi verrà definito dal filosofo tedesco Gottfried Wilhelm Leibniz "Ars combinatoria" (Leibniz, 1666). La struttura alfabetica è una matrice modulare che permette, per mezzo di un numero limitatissimo di simboli, di produrre un quantitativo potenzialmente infinito di parole, e chiarita l'importan-

za di questo sistema matriciale diviene ancor più evidente il motivo per cui la stampa a caratteri mobili possa essere considerata l'archetipo della macchina industriale. Tale macchina era infatti basata sul principio economico del costo marginale, ossia il costo aggiuntivo per produrre una unità in più di uno specifico bene.

Se si pensa a un libro riprodotto da uno scriba, il "costo" di ogni libro (tradotto in compenso per lo scriba) è uguale per ogni unità: non importa il quantitativo di copie scritte, dato che comunque lo scriba ci avrebbe impiegato lo stesso numero di settimane per produrli. Che fosse stata trascritta una copia oppure 20, il costo starebbe sempre risultato il medesimo: ossia un prezzo di X settimane necessarie allo scriba per completare una copia di un libro. Il paradosso della stampa a caratteri mobili invece risiede nel fatto che all'aumentare delle copie prodotte, il costo di produzione di ogni singola copia aggiuntiva diminuisce. Questo per il fatto che ad ogni copia prodotta per mezzo della stampa, i costi iniziali di cui ci si è fatti carico per la costruzione dello stampo (ossia, la matrice) vengono ammortizzati dal ripetuto uso di quest'ultimo. Questo concetto economico è il pilastro fondamentale di qualsiasi produzione nata con la rivoluzione industriale, ossia la relazione comprovata tra aumen-

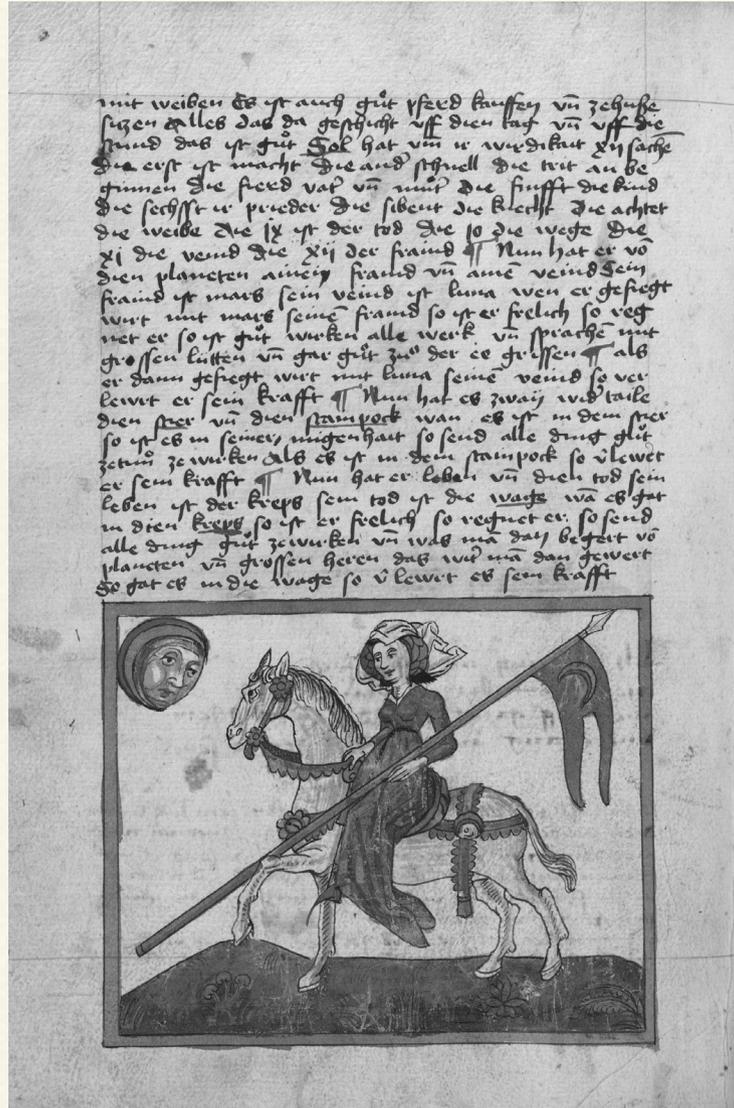
to della produzione e correlata diminuzione del costo unitario del prodotto, chiamata economia di scala.

Per comprendere ancora meglio tale concetto, l'economia di scala della stampa a caratteri mobili potrebbe essere massimizzata se l'alfabeto fosse composto non da 26 simboli ma solamente da due, come per esempio A e B. Anche solamente con due simboli è possibile descrivere tutti i pensieri passati e futuri dell'essere umano, e non è un caso che infatti oggi giorno l'intera trasmissione delle informazioni è basata sul metodo più economico possibile (in termini di risorse), ossia gli 0 e 1 del sistema informatico. Alla base di tutto ciò vi era dunque l'incentivo a continuare a stampare il più a lungo possibile: l'unica caratteristica necessaria è che ci fosse una platea abbastanza ampia che fosse interessata nell'acquisto del prodotto (e non è un caso che nell'Europa medievale di Gutenberg il primo libro stampato fu proprio la Bibbia), perché al contrario dello scriba – che possiede un costo orario – la stampa a caratteri mobili seguiva la regola del "più copie fai, più economica sarà ciascuna copia, più clienti avrai".

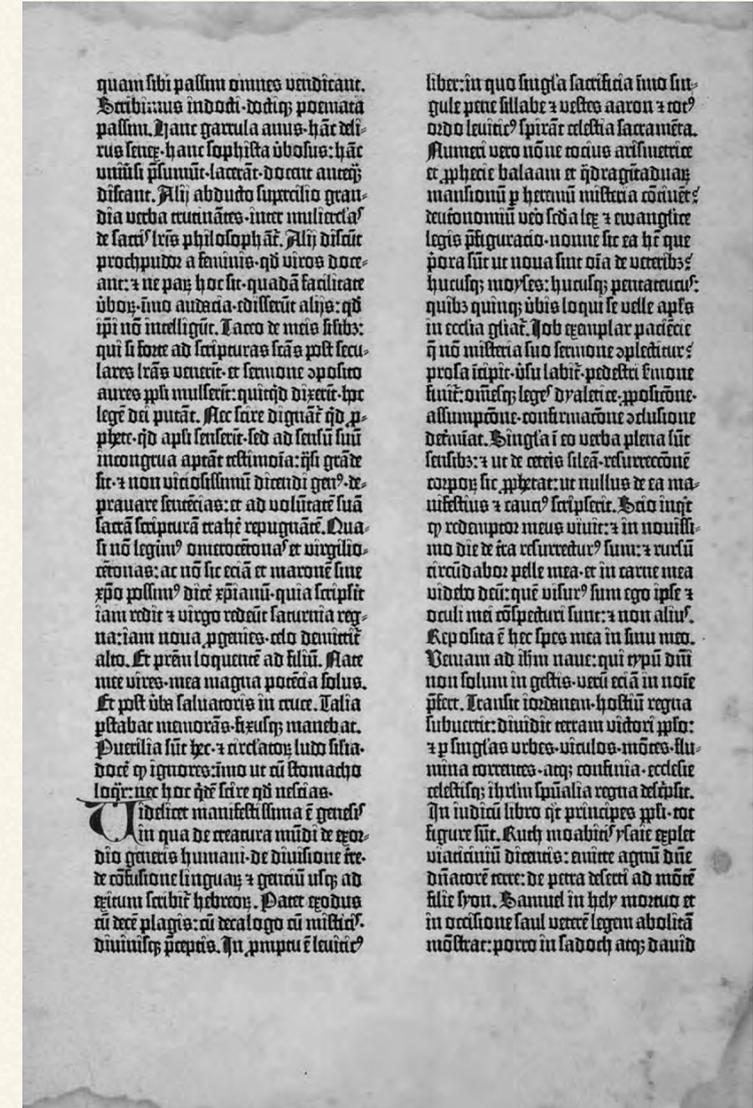
C'è da sottolineare il fatto che, quando i libri stampati iniziarono a far concorrenza ai li-

bri prodotti artigianalmente, non passò molto tempo prima che una fetta della popolazione iniziò a detestare questo metodo produttivo: le copie venivano considerate scadenti e di bassa qualità, e lo stesso John Ruskin in una lettera a Pauline Trevelyan del 1854 ricondusse la stampa a caratteri mobili "la radice di tutti i mali" in quanto "quell'abominevole arte della stampa fa sì che la gente sia abituata ad avere tutto della stessa forma".

*"That abominable art of printing"  
that "makes people used to have  
everything the same shape."  
(Ruskin, 1854)*



Artista ignoto - manoscritto prodotto con acquarello e inchiostro intitolato "Miscellanea: Descrizione anatomico-fisiologica degli uomini; Liber Synonimorum", ca. 1464. (fonte: Paul Getty Museum)



Johann Gutenberg - Bibbia prodotta con stampa a caratteri mobili, p. 14, ca. 1454-1456. (fonte: Harry Ransom Center)

Ruskin non nascose mai il suo astio verso la totalità del mondo che stava venendo creato dalle macchine industriali, probabilmente facilitato dal fatto che potesse avere, tra le altre cose, la libertà economica di poter scegliere di viaggiare tutta Europa in carrozza anziché in treno. Ma di fatto questi tipi di prodotti industriali non erano chiaramente indirizzati ai benestanti figli di ricchi fabbricanti di Sherry: la caratteristica rivoluzionaria di tali oggetti risiedeva nel loro prezzo sempre più contenuto che permetteva alla stragrande maggioranza della popolazione meno abbiente – nel senso di meno abbiente dei benestanti, come la classe media - di permettersi tali prodotti un tempo inaccessibili. Comunque sia, la repulsione verso la meccanizzazione che si tramutò verso il movimento Arts and Crafts non fermò il motore della svolta industrializzata, ed anzi questo colpo di coda reazionario del movimento morrisiano causò involontariamente l'esatto opposto del ritorno all'artigianato, ossia il movimento moderno. La macchina di Gutenberg non fu altro che un pallido presagio della

*“Customers went to see an artisan car maker and they ordered a car to be made to their taste, much as they would have ordered a custom-made shirt, or suit, from a tailor.”*  
(Carpo, 2023)

rivoluzione che avvenne quattro secoli più tardi: la meccanizzazione dei processi produttivi basata su standardizzazione massiccia delle unità prodotte e alla base della quasi totalità degli oggetti che tutt'oggi ci circondano. Matrici, stampi, calchi, moduli e quant'altro sono stati gli elementi che hanno permesso il permeare dell'economia di scala in ogni settore, persino in quei settori i cui prodotti erano pensati esclusivamente per la classe più abbiente dell'epoca, come quello automobilistico.

Il campo del automotive, pur essendo figlio della seconda rivoluzione industriale – grazie alla raffinazione dei combustibili fossili, della produzione su larga scala di lamierati e di tutti quei materiali prodotti industrialmente quali gomme o bachelite – era essenzialmente ancora riconducibile all'artigianato: le automobili infatti venivano prodotte su ordinazione e realizzate su misura seguendo i gusti specifici del cliente, “[...] proprio come avrebbero ordinato una camicia, o un abito, su misura dal sarto.” (Mario Carpo, 2023, p.9).

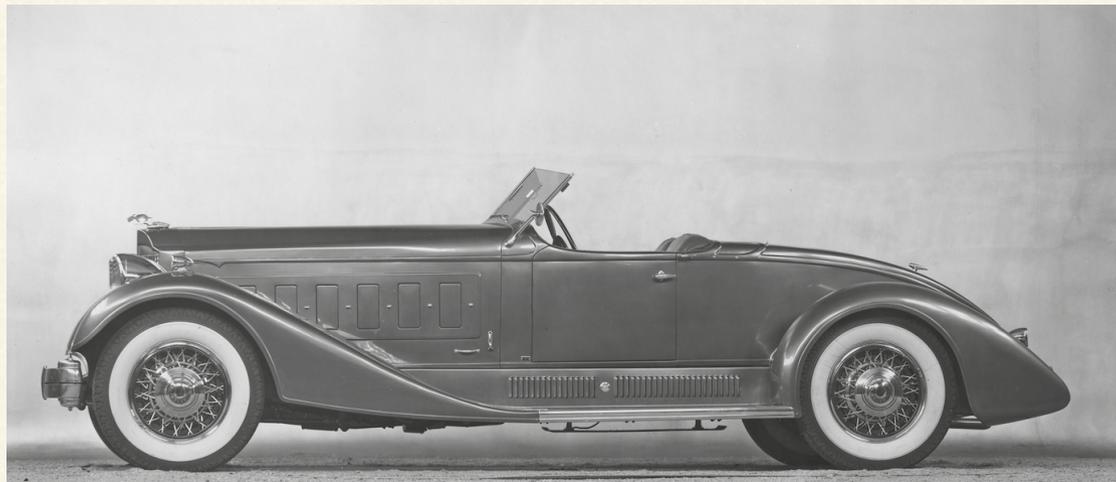
Il concetto dell'automobile è stato rivoluzionato grazie alla ben nota storia della Model T di Henry Ford, prima automobile prodotta in serie secondo una procedura standardizzata e con una catena di montaggio (catena di montaggio per di più concetto ideato dallo stesso Ford). Come accaduto con il libro, l'abito, la credenza e il sofà, ora anche l'automobile cominciava a non essere più un prodotto personalizzato, ma standardizzato e realizzato in decine di migliaia di copie identiche tra loro. Il vantaggio economico era tale che le caratteristiche che ora i clienti non potevano più scegliere, come addirittura la verniciatura

*“Any customer can have a car painted any colour that he wants so long as it is black”*  
(Ford, 1923, p. 72)

cadevano in secondo piano paragonato al prezzo offerto: nel 1914, dopo l'aumento di salario a 5 dollari giornalieri, una Model T costava meno di quattro salari dell'operaio meno specializzato. Non solo: dal 1910 al 1925 la standardizzazione del processo produttivo fu tale che il prezzo crollò dagli iniziali 900 dollari a soli 260 dollari (Ford Motor Company, 2020). Questo esempio di miracolo industriale, che segnò in maniera cristallina il passaggio da

artigianato a industria nel settore del automotive, fu presto intercettato e ammirato post Grande Guerra dall'architetto dell'industrializzazione per eccellenza, Le Corbusier.

Non è chiaramente un caso l'estrema fascinazione dell'architetto svizzero verso il modello fordista: è infatti ben nota la sua formazione presso gli studi di Auguste Perret – pioniere dell'utilizzo del calcestruzzo armato – e Peter Behrens – padre del proto-razionalismo tedesco. Entrambi gli architetti avevano una forte attrazione verso ciò che riguardava il presente - la rivoluzione industriale – da un punto di vista materico o espressivo-figurativo. Il loro allievo non fu da meno, ed anzi si fece portavoce di tale messaggio catalizzando il concetto di produzione di massa nell'ambito architettonico con toni quasi esasperati: sin dai suoi primi saggi degli anni '20 pubblicati sulla sua rivista L'Esprit Nouveau, e successivamente raccolti nel suo più noto *Vers une Architecture* del 1923, Le Corbusier ha sempre evidenziato il provocatorio parallelismo tra architettura e macchina. Come l'automobile presentava inizialmente la problematica di essere un prodotto per l'élite in quanto prodotta in maniera artigianale, anche per l'architettura vi era il medesimo problema, in quanto ogni edificio



*Versione del 1933 del "Brown Bomber Packard Macauley speedster, vista laterale sinistra. Notare le modifiche sulla versione del 1933: parafanghi anteriori completi; corone a punta alta, completamente oscuranti, minigonne, parafanghi posteriori a pontone; corone a punta a posteriori con lenti a V; parte superiore dei cerchi ripetuta, tema della forma del radiatore Packard, antenna radio sotto il predellino.  
(fonte: Detroit Public Library)*



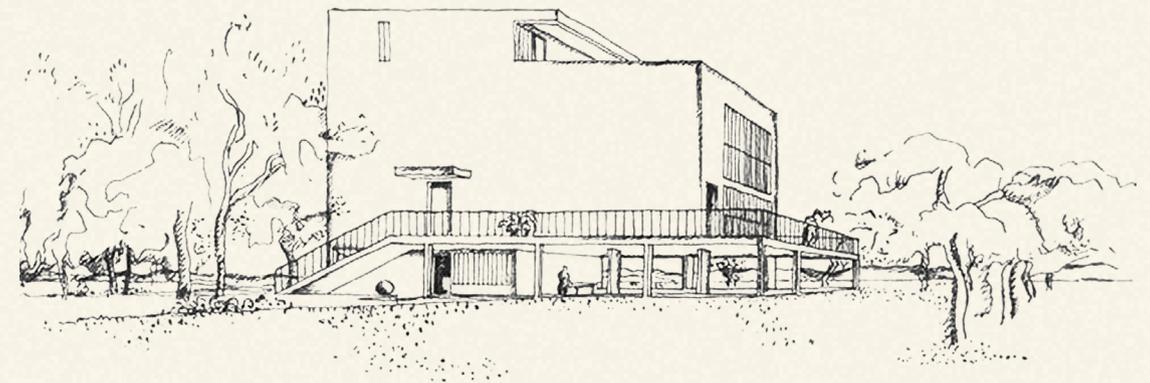
*Ford Roadster, ca. 1923 (fonte: Local of Congress).*

era prodotto su misura e fatto a mano. E come il modello fordista era riuscito a rendere l'automobile un prodotto di massa, anche il modello lecorbusiano prometteva di poter produrre un'architettura accessibile a tutti, standardizzata e industrializzata come un qualsiasi altro prodotto da catalogo.

La "Maison en série Citrohan (pour ne pas dire Citroën)" era infatti riferita alla nota casa automobilistica francese, la quale fu la prima ad adottare il modello fordista in Europa: Lo stesso Le Corbusier cercò di convincere il fondatore André Citroën a finanziare il padiglione dell'Esprit Nouveau dell'Esposizione delle Arti Decorative e Industriali del 1925, e non riuscendo nel suo intento si rivolse alla concorrenza della casa automobilistica Voisin, da cui poi prese il nome il suo più noto Plan Voisin. Questo piano urbanistico è forse la sintesi migliore della visione che Le Corbusier aveva all'epoca per quanto riguarda le città: l'architetto svizzero, infatti, non si preoccupava ermeticamente della sola architettura e di come produrla, ma dell'intero sistema concettuale che fondava le città. Il Plan Voisin non sarebbe stato così sensazionale – e provocatoriamente radicale – senza la sua caratteristica definire per la prima volta in maniera chiara e moderna il ruolo delle automobili nelle

città; paradossalmente, analizzando il modello esposto durante l'EXPO del 1925, il nuovo piano urbanistico parigino - per il quale Haussmann a confronto sarebbe passato da essere sventratore a moderato e discreto pianificatore – sembrava quasi relegare a ruolo di protagonista non il cittadino, ma l'automobile. Pur non conoscendone i dettagli tecnici - in quanto non forniti dallo stesso Le Corbusier - la Maison Citrohan del 1921 quasi certamente era stata ipotizzata in calcestruzzo armato: vi è da rammentare il fatto che negli anni '20 del XX secolo tale tecnologia era stata ideata da poco più di 50 anni ed ancora relativamente poco testata. All'epoca, dunque, si riteneva che la scelta tecnicamente migliore fosse quella di gettare l'agglomerato cementizio in situ, una soluzione tutt'altro che standardizzata e meccanizzata ed anzi l'esatto opposto: la prefabbricazione nell'industria e il successivo trasporto e assemblaggio era estremamente dispendioso oltre che particolarmente complicato, al contrario di un'operazione estremamente più semplice – ma di fatto, estremamente artigianale e manuale – del gettare in opera la struttura (Carpo, 2023).

Se da un lato la prima radicale teoria lecorbusiana promuoveva sensazionalmente la prefabbricazione - ma di fatto



Le Corbusier - Maison Citrohan, sans lieu, 1922  
(fonte: Fondation Le Corbusier)



El Lissitzky - *Volkenbügel*, vista di piazza Nikitskaia da viale Nikitskii, 1924-25.  
Fotomontaggio con inchiostro e matita colorata.  
(fonte: Archivio di Stato russo per la letteratura e l'arte, Mosca)

smentendosi in parte con la progettazione degli edifici ideati a causa del successivo scontro con la cantierizzazione - vi sono comunque altri architetti che fecero dell'economia di scala una sorta di estetica architettonica. Oltre a necessariamente citare i ben noti grattacieli di Mies Van Der Rohe della fine degli anni '20, vi furono altri promotori di tale visione economico-produttiva che fecero della standardizzazione una sorta di provocazione verso l'architettura tradizionale; i "Wolkenbügel" del 1923 di El Lissitzky, pur rimasti allo stato concettuale, esprimevano nella trasparenza delle facciate e nell'orditura dei montanti una chiara celebrazione all'industrializzazione e standardizzazione dei componenti architettonici. La coniuge di El Lissitzky fu ancora più esplicita e radicale nell'affermare quale fosse l'obiettivo finale dell'applicazione delle logiche di produzione di massa nell'architettura:

*"Building norms and construction times must be worked out, so that building can be transferred to mass-production factories and houses ordered from a catalogue."*  
(Lissitzky-Küppers Sophie, 1967, p.374)

Di fatto tutte queste serie di suggestioni architettoniche possedevano il medesimo comun denominatore che riguardava la visione del taylorismo, ossia "L'organizzazione scientifica del lavoro, basata sullo studio dei fattori da cui dipende il rendimento del binomio uomo-macchina, e parte sullo studio dei movimenti e dei tempi necessari per ottenere una unità di prodotto." (Oxford Languages).

Una panoramica interessante del dialogo tra taylorismo e architettura è stata prodotta nel libro "The Taylorized Beauty of the Mechanical: Scientific Management and the Rise of Modernist Architecture" (Guillén, 2006), in cui l'economista Mauro F. Guillén svolge un lavoro di ricerca eccezionale nel cercare di delineare quali fossero le motivazioni tecniche, politiche e sociali che stimolarono le suggestioni architettoniche del movimento modernista: tra le varie supposizioni, un'interessante proposta dell'autore suggerisce il fatto che fosse più corretto non dare un forte peso ai meri avanzamenti tecnologici promossi dalla rivoluzione industriale, in quanto essi furono certamente necessari ma non sufficienti per la gemmazione del movimento moderno. Un paragone svolto tra gli Stati Uniti e la Germania degli anni '20 e '30 sottolineava infatti la questione che



in questi due paesi - pur avendo entrambi per l'epoca un avanzato sistema produttivo industriale - l'output di questo potenziale "strumento di produzione standardizzata" non fu il medesimo. Dal lato tedesco la fascinazione della meccanizzazione portò alla nascita della scuola del Bauhaus e alla creazione del design industriale, mentre dall'altro lato, nel continente americano, "architettura e design finirono per dipendere da un mercato di consumo di massa di manufatti culturali non sofisticati e spesso definiti kitsch." (Guillén, 2006, p.39).

Questa breve parentesi riguarda le tesi esposte da Guillén era necessaria per sottolineare il fatto che il parallelismo tra architettura moderna ed economie di scala è tutt'oggi ancora estremamente delicato. In questo capitolo, comunque, l'obiettivo è stato quello di tracciare non tanto le motivazioni dietro ai differenti movimenti e avanguardie architettoniche, ma come di fatto le economie dell'epoca e i metodi produttivi alla base di quest'ultime si rispecchiassero nell'ambiente costruito, all'interno del quale "[...] l'identità (architettonica) è sia l'indice che il simbolo dell'ambiente taylorizzato prodotto dalle macchine." (Carpo, 2023).

*(sopra) Mart Stam - sedia Thonet S34 con braccioli e struttura tubolare d'acciaio cromato, 1926. Una delle prime sedie a sbalzo nella storia dell'arredamento. (Fonte: The Wolfsonian Museum)*

*(sotto) Globe Parlor - Sedia n. 30, mogano filippino a vista, tranne i montanti posteriori, 1940. (fonte: Globe Parlor Furniture Company, p. 8)*

## 2.2 L'obsolescenza della standardizzazione

Potrà sembrare eccessivamente ripetitivo, ma è bene sottolineare un'ultima volta l'importanza del concetto di matrice riutilizzabile nel mondo industrializzato che ha segnato l'intero XX secolo, perché chiarito ciò e il suo indissolubile legame relativo al costo marginale, si riesce a comprendere perfettamente come la logica digitale sia il suo esatto opposto. Come discusso estensivamente nel capitolo precedente, la stampa a caratteri mobili di Gutenberg rappresentava in maniera cristallina l'importanza del concetto di matrice: ogni stampo di ogni singola lettera necessitava di essere utilizzato il più a lungo possibile in modo tale da distribuire il suo costo iniziale nel maggior numero di copie prodotte, sino a quando non avrebbe più

potuto garantire una soglia minima di qualità di stampa e doveva essere necessariamente sostituito.

Oggigiorno chiaramente non si utilizza più tale sistema, il quale è stato sostituito da successive innovazioni tecniche. Lo standard di oggi è invece la stampante a getto d'inchiostro, la quale svolge il medesimo compito ma con logiche di produzione opposte. Al contrario della macchina di Gutenberg, infatti, le stampanti a getto d'inchiostro (ma anche quelle a laser) non prevedono alcuna matrice meccanica o stampo da imprimere sulla carta: al contrario, la testina di stampa necessita semplicemente di muoversi orizzontalmente sullo spazio foglio e di depositare un controllato quantitativo di gocce

d'inchiostro ove necessario. Lo spazio foglio, che sarà digerito dal computer come una griglia cartesiana di punti di 0 e 1 – dove 0 sta a significare “no inchiostro” e 1 “si inchiostro” – diventa dunque semplicemente una lunga lista di codici binari, una sorta di “manuale” numerico che descrive esattamente, punto dopo punto, dove gettare le gocce d'inchiostro e dove no. La sensazionalità di questo metodo è che di fatto non è necessario nessuna modifica “meccanica” per decidere cosa stampare: che sia un ricettario della cucina regionale bavarese oppure un manuale tecnico di smontaggio di aspirapolveri, il metodo di stampa e i meccanismi rimangono identici; l'unica cosa che cambia tra i due testi scritti sono i kilobyte che contengono le serie di 0 e 1. Questa pura informazione ha un costo elettrico quasi nullo, non possiede materialità e viene cancellata e riscritta milioni di volte senza nessuna usura fisica o meccanica (Carpo, 2023).

Quando una pagina viene stampata, la successiva non necessita di riutilizzare alcuno stampo o matrice: l'unica variabile, infatti, sono le istruzioni (ossia i kilobyte) inviate alla stampante, e tali istruzioni vengono scritte e sovrascritte a costi quasi nulli. Ciò significa che essenzialmente ogni nuova pagina è slegata totalmente

rispetto a ciò che è stato stampato prima, ed ogni nuova pagina può essere completamente diverso rispetto alla precedente. Ogni nuovo foglio stampato sarà visto come un'operazione a sé stante, e ciò significa che il costo unitario di ogni singolo foglio sarà sempre il medesimo: non importa che si stampino 10.000 copie della stessa ricetta bavarese, oppure 10.000 fogli differenti ognuno contenente una unica ricetta bavarese differente dalla precedente e dalla successiva, perché in questo caso non vi sono costi iniziali di stampi “deteriorabili” da ammortizzare (da chiarire che in entrambi i casi – ossia nella stampante di Gutenberg e in quella a inchiostro – i costi dell'acquisto della macchina non sono considerati). Di conseguenza, non vi è alcuno stimolo economico ad aumentare la produzione di copie per minimizzare i costi marginali causati dagli stampi: in breve, non esiste più il concetto per cui ogni copia prodotta è meno costosa della precedente, ma vi è il paradigma che ogni copia ora ha un costo identico, che sia stata stampata una volta o 10.000 volte, e tale costo è inoltre quasi nullo – in quanto rispecchia il costo “elettrico” della trasmissione delle informazioni. Non si tratterà più di una curva tendente a zero che descriverà il costo marginale, bensì sarà una retta con  $y=costante$  che descriverà quello che viene denominato

dagli economisti “costo marginale piatto” (Paulson, 1948).

Questo ragionamento può sembrare eccessivamente involuto, in particolare quando esemplificato con una tecnologia così scontata della nostra quotidianità (ovvero la stampante a getto d'inchiostro): avendoci a che fare tutti i giorni si è forse in parte perso un po' lo stupore che nasce dalla produzione di stampe uniche con costi fissi. Un esempio che potrebbe far comprendere meglio il potenziale di questo metodo produttivo è dimostrandolo con una tecnologia che invece non è ancora, per il momento, molto comune nel nostro quotidiano, ossia le stampanti 3D. Sorvolando sui tecnicismi e sulle nette differenze tra i vari modelli, il concetto alla base di una stampante 3D si fonda sul principio che esiste un filamento di materiale (plastico, metallico o fibroso) che, scaldato, passa a uno stato simil solido, quasi liquido: al contrario della stampa 2D – ossia quella sopra citata a getto d'inchiostro – l'ugello ha la possibilità di muoversi non solamente lungo una linea (una dimensione) ma in un'area di generico un piano XY (due dimensioni). Non solo: al contrario del precedente foglio di carta, “ancorato” alla sua essenza bidimensionale, è presente invece un piatto metallico o plastico che può muoversi lungo l'asse Z.

Comparando i due sistemi, l'ugello della stampante a inchiostro è obbligato a stampare una curva bidimensionale appartenente ad un piano XY (il foglio), mentre l'ugello della stampante 3D – pur muovendosi anch'esso in un piano XY – potrà stampare una curva tridimensionale, in quanto il piatto di supporto sottostante si muoverà al tempo stesso lungo l'asse Z.

Avendo chiara la netta differenza tra i due sistemi, si può pensare a come utilizzare il potenziale della stampa 3D. In tutta onestà, anzi, è più interessante esemplificare come una stampante 3D NON dovrebbe essere utilizzata, o meglio, per la quale non è stata ideata. Se si provasse ad applicare le logiche di scala citate sino ad ora per la produzione di una statuette di un castoro, si potrebbe immaginare che all'aumentare della produzione di statuette il prezzo diminuirebbe. E dunque si sarebbe stimolati a produrre il più possibile, per abbattere i costi di produzione e vendere ad un prezzo minore. Questo accadrebbe se effettivamente la stampante 3D necessitasse di uno stampo o calco per la realizzazione della statuette, stampo dunque con un suo costo (e non irrilevante, dato che deve avere la massima durabilità per produrre più copie possibili) che deve essere ammortizzato. Ma come descritt-

to precedentemente, la stampante 3D necessita solamente di movimenti meccanici dell'ugello e del piatto di posa per poter produrre un elemento 3D (non considerando il filamento del materiale ovviamente, come precedentemente non era considerato il costo di inchiostro e carta). E' necessario dunque solamente il costo elettrico – irrilevante – per la trasmissione delle informazioni su come ugello e piatto devono coordinarsi nei movimenti per la stampa. Comprendendo questa dinamica, dunque, è chiaro come la logica di produzione di massa non è più obbligata a basarsi sulla copia, in quanto il senso stesso della sua esistenza nasce dall'ammortizzazione dei costi. Al contrario, senza lo stimolo economico di doversi limitare a produrre il minor quantitativo possibile di oggetti differenziati – in questo caso statuette – viene a mancare quello che è il principio fondante della standardizzazione. In questo caso, ogni singola statuette è, utilizzando un termine volutamente provocatorio, “nata dal nulla”: ogni statuette realizzata potrà essere completamente differente dalla precedente, e dunque si passa a stampare prima un castoro, poi un elefante e successivamente un bradipo. Se le dimensioni di tali statuette sono le medesime, i tempi di produzione – e dunque costi - non cambieranno perché alla macchina non interessa cosa

sta stampando, alla macchina interessa solo che non si interrompa la linea di produzione. In questo caso, infatti, l'obiettivo finale per la massimizzazione del profitto non risiede nell'ammortizzazione dei costi di matrici e calchi, ma ha invece puramente come riferimento il fatto che la stampante non deve mai smettere di produrre, in quanto se venisse utilizzata solamente per poche ore al giorno vi sarebbe un mancato sfruttamento del potenziale di produzione, e dunque di relativi introiti. Tale mancata opportunità, comunque, denominata dagli economisti costo opportunità (Leininger, 1977), appartiene a qualsiasi macchinario di produzione inventato dall'uomo, dalla stampa di Gutenberg a quella 3D. Il termine che meglio descrive questa sorta di paradosso logico produttivo è “personalizzazione di massa”: tale principio può sembrare contemporaneo e digitale, ma già nel 1987 Stanley M. Davis nel suo libro “Future Perfect” definiva la mass customisation “[...] ready to make its debut now.” (Davis, 1987, p. 140). Tale proposta postmodernista verso un mondo sempre più standardizzato sottintendeva la possibilità di unire due mondi tra di loro opposti, ossia il mondo dell'artigianato - che permetteva di produrre oggetti su misura ma non in termini di economie di scala - e quello dell'industria, che al con-

trario ragiona religiosamente sulla massificazione del mercato e che al tempo stesso non può intrinsecamente offrire la personalizzazione del singolo prodotto. Il sarto produce il tailleur su misura, la fabbrica il prêt-à-porter. Il sarto produce 30 capi all'anno, la fabbrica 30.000. L'unione di questi due mondi porterebbe a quello che è stato concettualizzato a metà degli anni '90 con il termine di "serialità non standard" o "variabilità digitale" (Carpo, 2011): vale a dire producendo oggetti con i vantaggi dei metodi produttivi industriali - ossia medesimo costo di ogni prodotto - e artigianali, ovvero personalizzazione del singolo prodotto.

*"Making more identical copies of the same item will not make any of them cheaper, making all of them different will not make any of them more expensive. Standardisation no longer saves money and individual variations no longer cost money."*  
(Carpo, 2017a, p. 32-33)

*"Creare più copie identiche dello stesso articolo non ne renderà nessuna più economica, e renderle tutte diverse non ne renderà nessuna più costosa. La standardizzazione non fa più risparmiare denaro e le singole varianti non costano più."*

La teoria della serialità non standard presuppone il fatto che la logica dell'economia di scala basata su matrici sia di per sé irrilevante nel quadro di una produzione digitale: questo paradigma tecnologico permetterebbe dunque di ipotizzare delle nuove economie non basate più sulla scala, con gli stessi potenziali sconvolgimenti che la stessa rivoluzione ha portato alle società occidentali due secoli fa con il modo di fare della "copia" (Carpo, 2023).

Come analizzato nel capitolo precedente, il movimento moderno ha esemplificato architettonicamente ciò che era l'economia di scala e la standardizzazione: non è un caso che la trave in acciaio a doppia T è il simbolo per antonomasia dell'industrializzazione, contenente l'intrinseco significato della produzione di massa. Tale simbolo è stato usato chiaramente dagli esponenti del periodo come portabandiera della modernità: la Neue Nationalgalerie di Mies è composta da una griglia di travi IPE tutte uguali la cui maggior parte è chiaramente sovradimensionata rispetto al suo ruolo, ma seguendo le logiche di scala dell'epoca si è calcolata la sezione maggiormente sollecitata e si è successivamente applicata a tutte le travi. Chiaramente non si vuole ridurre la genialità dell'operato di Mies a un mero o addirittura ozioso calcolo statico: vi

ragioni ben più importanti da un punto di vista teorico e compositivo per il quale sono state scelte sezioni tutte uguali per la copertura del padiglione, ma tali scelte comunque sottintendevano una visione economica del mondo la quale veniva espressa esattamente grazie alla serialità della medesima sezione: ossia che più copie vengono comprate e utilizzate, meno queste copie costeranno.

Questa logica è valsa per tutto il XX secolo in quanto il costo delle materie prime e il costo dell'energia era quasi irrilevante o, meglio, era ben più rilevante il costo della manodopera (Carpo, 2023). Questo tipo di economia è divenuta col passare dei decenni sempre più insostenibile, sia rispetto alle variabili tradizionali - vedasi prezzi dell'energia - sia in base a nuove variabili nate negli ultimi anni, come i costi ambientali. Se oggi volessimo produrre un padiglione che sia espressione della personalizzazione di massa sicuramente non otterremo il padiglione di Mies, il quale era invece espressione della produzione di massa: ciò che otterremmo sarebbe più probabilmente un oggetto simile al padiglione prodotto da Studio RAP. Lo "SkilledIn Office" dello studio olandese segue le esatte logiche opposte di quelle esposte dal padiglione miesiano: al contrario delle identiche sezioni delle travi

portanti in acciaio presenti nel primo caso, nel secondo non esiste un singolo pannello di legno dei 225 prodotti che sia uguale ad un altro. Il primo edificio fabbricato roboticamente nei Paesi Bassi, inoltre, possiede una forma basata esclusivamente sull'ottimizzazione statica: al contrario delle sovradimensionate travi miesiane, qui la copertura lignea segue la miglior forma strutturale utilizzando il minor quantitativo di legno necessario. Sembrerebbe paradossale da un punto di vista geometrico, ma pure un tetto piano utilizzerebbe più materiale di quello impiegato nella volta lignea, questo perché - al contrario della volta che lavora esclusivamente a compressione - la copertura piana dovrebbe preoccuparsi anche di far fronte alle sollecitazioni causate dal momento, e ciò significherebbe aumentare la sezione della copertura. In questo caso invece il profilo della volta segue esattamente il flusso delle forze, permettendo di utilizzare pannelli dello spessore di pochi centimetri. Questa soluzione è stata resa possibile esclusivamente grazie alla non standardizzazione del prodotto e alla personalizzazione di ogni singolo elemento, basandosi esclusivamente sul digital fabrication e computational design, due termini chiave per la comprensione del quadro dell'architettura digitale.



*Mies van der Rohe - Neue Nationalgalerie, Berlino, 1969 (fonte: Domus)*



*Studio RAP - SkilledIn Office, RDM Rotterdam, 2016 (fonte: Studio RAP)*



*Mies van der Rohe - Neue Nationalgalerie, Berlino, uno dei ventidue saldatori coinvolti nella costruzione del padiglione, 1966-1967.  
(fonte: Staatliche Museen zu Berlin)*



*Studio RAP - SkilledIn Office, RDM Rotterdam, braccio robotico a 6 assi di rotazione per il taglio della pannellatura lignea tramite fresa, 2016.  
(fonte: Studio RAP)*

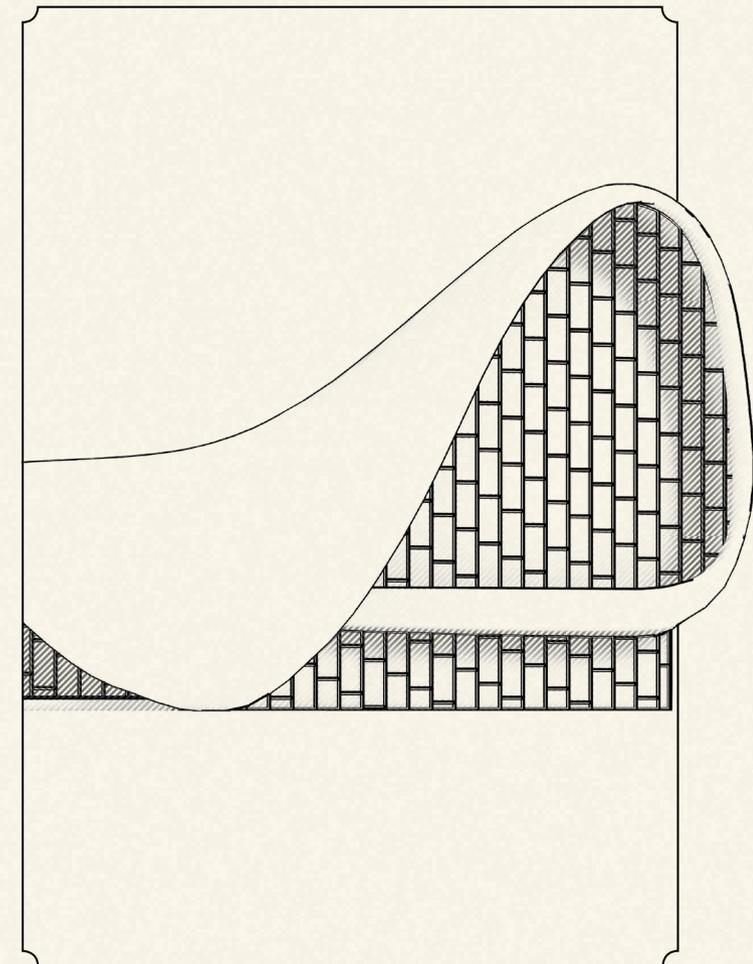


*Mies van der Rohe - Neue Nationalgalerie, Berlino, dettaglio soluzione ad angolo della griglia di travi a doppio T, 2021.  
(fonte: Artribune)*



*Studio RAP - SkilledIn Office, RDM Rotterdam, dettaglio della copertura interna che mostra le pannellature uniche tra loro, 2016.  
(fonte: Studio RAP)*

- Capitolo III -  
IL RIFIUTO  
DELL'UNIFORMITÀ

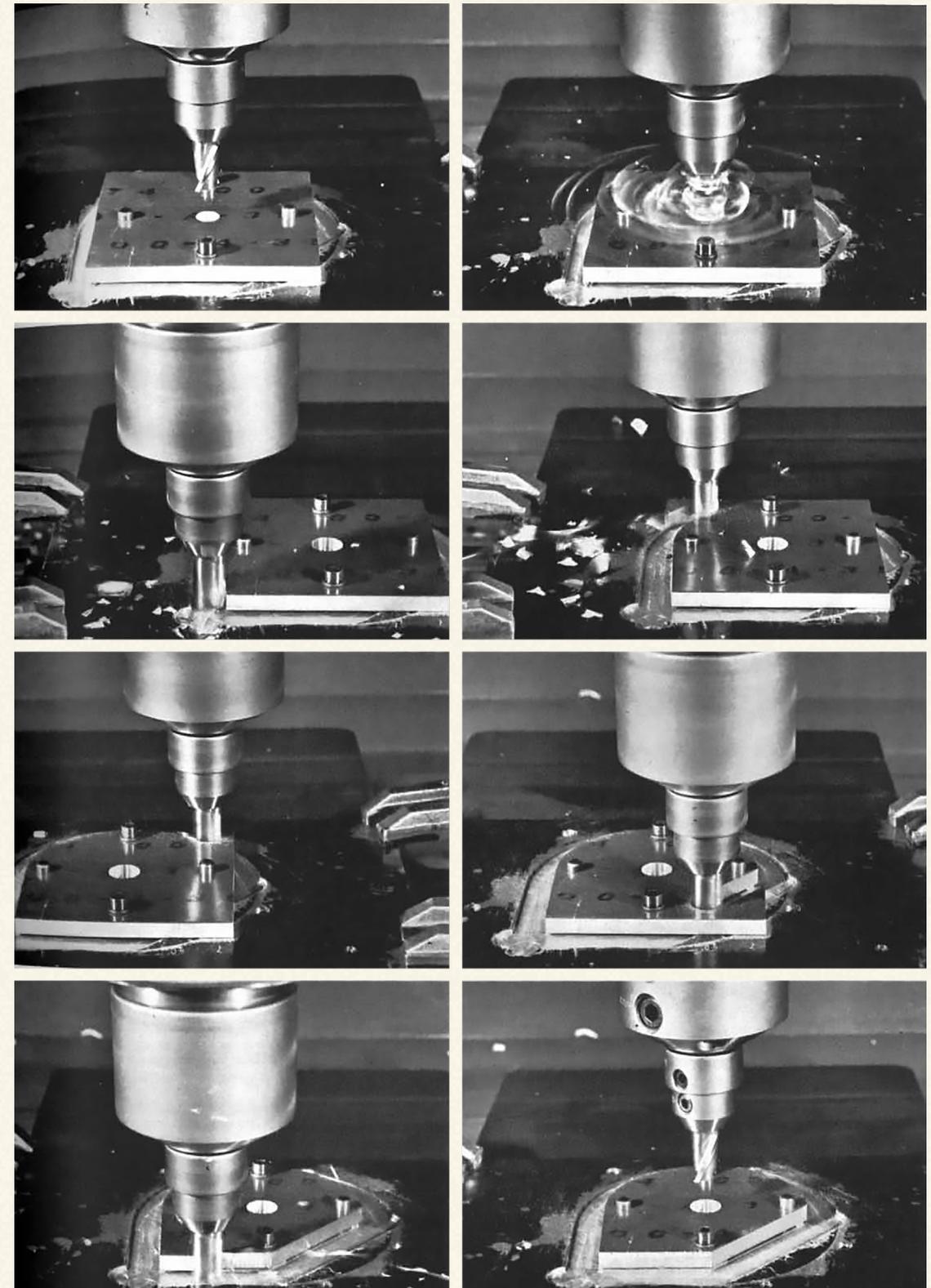


## 3.1 Digital Fabrication

Il termine digital fabrication ha radici in ciò che è stato già citato precedentemente, ossia la digitalizzazione dell'informazione tramite codici binari. Questa rivoluzione avvenne nel 1952 quando in uno dei centri di ricerca del Massachusetts Institute of Technology (MIT) si collegò per la prima volta un computer ad una fresatrice: sino ad allora era indispensabile un macchinista che girasse le viti per la movimentazione del laminato metallico, ma con il collegamento rivoluzionario computer-macchina tutto ciò non era più necessario. Non solo il processo era stato automatizzato a un punto tale che l'apporto umano era stato ridotto sensibilmente, ma addirittura i ricercatori erano stati in grado di produrre la componentistica desiderata, riguardante il

settore aeronautico, con delle forme ancora più complesse rispetto a quelle che potevano essere prodotte manualmente dall'operatore umano (Gershenfeld, 2012). Questo primo passo aprì le porte al metodo produttivo nel quale il flusso di informazioni sottoforma di linguaggio informatico guida direttamente le macchine di produzione. I primi risultati di questo nuovo metodo produttivo furono infatti le fresatrici CNC (Computer Numerical Control), le quali permettono di operare tutta una serie di strumentazioni industriali (come frese, getti ad acqua o laser) tramite software. Oggigiorno quando si parla di macchina CNC ci si riferisce spesso alle fresatrici – in quanto sono le più comuni – ma di fatto il concetto macchina a controllo numerico attiene a qual-

*Macchina a controllo numerico del MIT, 1952. La macchina ha un movimento universale: la "testa", che tiene l'utensile da taglio, si muove verticalmente; la "slitta trasversale" muove la testa avanti e indietro sul tavolo; il tavolo si muove da un lato all'altro sotto l'utensile. Il sistema di controllo coordina tutti e tre i movimenti simultaneamente per eseguire le operazioni illustrate nella pagina a fianco.  
(fonte: Scientific American, p. 103)*



**Potter** HIGH SPEED  
**ELECTRONIC COUNTERS**  
 INDISPENSABLE TO THE

**AUTOMATIC  
 FACTORY**

FOR  
**COUNTING**

**TIMING**

AND  
**CONTROL**



**MACHINE AND PROCESS CONTROL**

INSTRUMENT  
**Potter**  
 COMPANY, INC.

*Pubblicità della Potter  
 Instrument Company,  
 1952.*

*“I contatori elettronici predeterminati ad alta velocità di Potter vengono utilizzati per il controllo automatico di un'ampia gamma di macchine e processi. I contatori sono utilizzati per fornire un'azione di controllo dopo una misura di quantità, dimensione, tempo, rivoluzione o qualsiasi azione che produca conteggi. Il programma, che rappresenta una sequenza di conteggi predeterminati, viene impostato su interruttori digitali. Quando si tratta di un numero elevato di passi, il programma di conteggi predeterminati e l'azione di controllo possono essere inviati da nastri perforati, schede o tope magnetiche. I contatori elettronici Potter sono inerziali e non presentano alcuna usura meccanica! È possibile effettuare conteggi a una velocità superiore a 1.000.000 al secondo, con una precisione assoluta.”*  
 (fonte: Scientific American, p. 105)

siasi macchinario che è azionato tramite linguaggi informatici e non manualmente. L'applicazione pratica del concetto di CNC verso la strumentazione meccanica ha portato a coprire la stragrande maggioranza dei rami della produzione: la fresatrice è stato solamente uno dei primi esempi, ma a partire dalla fine degli anni '50 le industrie cominciarono a “computerizzare” le informazioni di presse piegatrici, torni e saldatrici. Curiosamente questo applicativo informativo nel mondo della produzione non nasceva dalla necessità della personalizzazione del prodotto: nel 1996 infatti gli ingegneri consideravano le fresatrici CNC degli strumenti per la produzione di massa di piccole serie a lotti, in cui la problematica stava nel dover riconfigurare ogni volta la macchina per passare da un tipo di produzione ad un altro (Carpo, 2017). L'idea dunque di utilizzare le tecniche a controllo numerico per la personalizzazione di massa non nacque all'interno delle industrie, bensì nella generazione dei designer dei primi anni '90.

Se di fatto l'automatizzazione informatica divenne lo standard nel processo produttivo nella maggioranza dei settori industriali – vedasi il settore automobilistico che iniziò a implementare i bracci robotici già a partire dagli anni '70 –, il mondo del design e dell'architettura tardò notevolmente ad

interessarsi a questo tipo di rivoluzione tecnologica. A partire dagli anni '90, comunque, vi fu quello che Mario Carpo intitolò “The Digital Turn in Architecture” (Carpo, 2012): lo storico d'architettura ripercorre i precedenti due decenni della progettazione architettonica a cavallo tra il 1992 e il 2012 evidenziando come le nuove tecnologie stessero rivoluzionando non solo la teoria architettonica, ma soprattutto la sua apparenza esteriore. Questa svolta digitale nacque da un crescente numero di progettisti che iniziarono a interessarsi a come controllare i metodi di produzione digitale, come le fresatrici CNC, la stereolitografia e la produzione additiva. Questo tipo di richiesta da parte dei designer era infatti derivata anche del fatto che nel medesimo decennio stavano nascendo i primi software “user-friendly” per la modellazione b-spline: figlia dell'ingegnere Bézier – il quale pubblicizzò il loro utilizzo per la progettazione delle carrozzerie curvilinee della Renault negli anni '60 – questo tipo di modellazione permetteva la progettazione semplificata di superfici a doppia curvatura estremamente complesse. In una sorta di ciclo di feedback tra i nuovi software di modellazione e gli innovativi strumenti di produzione, nacque uno stile architettonico alla fine del millennio chiamato oggi parametricismo, il quale si fece portavoce di una rinnovata fascinazione ver-

so le linee e superfici continue, lisce ed organiche (Carpo, 2023). Il risultato di questa nuova corrente architettonica è di fatto una architettura continua, “seamless”, ed è stata possibile esclusivamente grazie alla personalizzazione di massa dal punto di vista dei metodi produttivi, la quale ha portato ad una non-standardizzazione degli elementi costruttivi.

Senza necessariamente citare gli edifici portavoce di questa nuova corrente – come il Guggenheim Museum di Bilbao – vi furono diversi professionisti del settore che utilizzarono questi nuovi tool digitali pur non esplicitandoli dal punto di vista formale: uno dei primi audaci progettisti digitali fu Fabio Gramazio – noto per essere il progettista del Nest, l'edificio centro di ricerca dei Laboratori federali svizzeri per la scienza e la ricerca dei materiali – il quale nel 2004 progettò la Riedikon House in Svizzera. Promuovendo la digital craftsmanship sin dalla fondazione del suo studio nel 2000, l'architetto svizzero esemplifica chiaramente il potenziale delle tecnologie digitali nella pelle esterna dell'edificio: il rivestimento ligneo utilizzato per fornire ombra e tenere sotto controllo la privacy dell'edificio è composto da 315 lamelle lignee ognuna delle quali possiede una sezione unica. La progettazione “manuale” di ogni singola lamina



Gramazio Kohler Architects - Edificio residenziale, Riedikon, 2009.  
(fonte: Gramazio Kohler Architects)

## 3.2 Computational Design

La prima svolta digitale in architettura nacque non solo per merito dei progettisti che si appropriarono – a livello di know-how - dei mezzi di produzione, ma soprattutto sotto il profondo stimolo del nuovo e dirompente metodo di progettazione assistita al computer. Alla fine degli anni '80, infatti, diverse scuole in Europa e USA iniziarono ad offrire formazione di base in merito a tali software, i quali dimostrarono velocemente che non solo erano estremamente più efficienti nella realizzazione dei disegni “tradizionali”, ma permettevano persino di produrre dei nuovi tipi di disegni che precedentemente sarebbero stati estremamente complessi da realizzare manualmente. La manipolazione semplificata di curve complesse citata nel precedente

paragrafo portò chiaramente ad una nuova estetica architettonica dettata dalla continuità e sinuosità delle linee, ma questa fu solamente una parte della rivoluzione digitale. La questione più importante, che forse passò in secondo piano in quanto non esplicitata dalle facciate continue delle nuove architetture, risiedeva nel nuovo metodo di progettare, ossia il pensiero parametrico alla base di quelle nuove architetture continue. Tale architettura digitale, infatti, era possibile esclusivamente tramite il concetto di parametro che sino a quel momento era stato poco trattato nella progettazione architettonica. Il design computazionale, o design algoritmico, è un metodo di modellazione digitale nel quale le geometrie vengono descritte in base a determinati dati di input (definiti

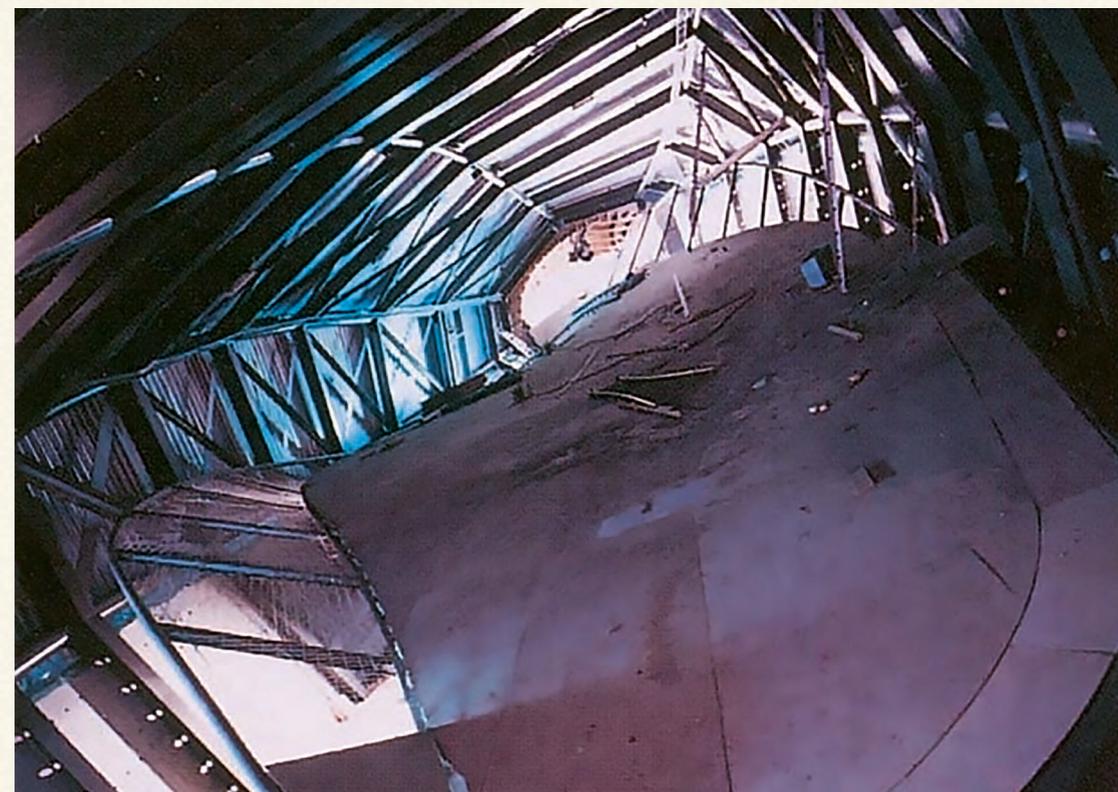
parametri) e i quali possono essere successivamente variati per la modifica immediata dell'oggetto. Potendo “riscrivere” la storia della geometria, è dunque possibile produrre un numero di variazioni semplicemente incomparabile rispetto a quelle che si sarebbero potute ottenere con gli strumenti di disegno tradizionali, CAD compresi.

Uno dei primi pionieri della progettazione algoritmica fu senz'altro Kas Oosterhuis, fondatore nonché professore di Hyperbody presso TU Delft e docente alla Qatar University dal 2017: probabilmente così in anticipo sui tempi – basti vedere la sua opera A2 Cockpit del 2005 – da passare quasi in secondo piano rispetto ad altre figure chiave del parametricismo del nuovo millennio come Patrik Schumacher, l'architetto olandese ha fatto del computational design il suo segno distintivo. Un esempio emblematico della sua carriera è rappresentato dal Padiglione dell'acqua salata del 1997: l'architettura fu progettata esclusivamente sulla base della modellazione parametrica in modo che “[...] mantenesse sia il controllo assoluto che l'assoluta flessibilità durante il periodo di costruzione.” (Oosterhuis, 1998). Per il mantenimento del controllo da un punto di vista estetico ed economico fu prodotto un database “tridimensionale” connesso

al modello anch'esso tridimensionale: in tal modo fu possibile produrre i dati di progetto per tutti i partecipanti relativi al processo di costruzione, talvolta direttamente utilizzati come input alle macchine CNC, mentre altre volte utilizzati direttamente in cantiere.



*Kas Oosterhuis/ONL - Padiglione dell'acqua salata, Olanda, vista esterna, 1993.  
(fonte: Carpo 2012, p. 123)*



*Kas Oosterhuis/ONL - Padiglione dell'acqua salata, Olanda, vista interna durante il cantiere, 1993.  
(fonte: Carpo 2012, p. 123)*



Il computational design, di fatto, non è altro che lo strumento che rappresenta virtualmente, tramite software, il pensiero alla base dell'architettura parametrica: Otto Frei - considerato un precursore del parametricismo da parte di Schumacher - ha perfettamente esemplificato nella sua carriera professionale cosa significasse applicare il concetto di continuità in architettura; con la progettazione delle tensostrutture leggere basate sull'utilizzo di modelli fisici - come nel caso dello Stadio Olimpico di Monaco di Baviera del 1972 - l'architetto tedesco non fece altro che dimostrare "analogicamente" come ricercare la forma più corretta a livello strutturale in base a un calcolo materiale.

*"[Otto Frei] used physical processes as simulations and design engines to 'find' form rather than to draw conventional or invented forms. The inherent lawfulness of the engaged physical processes produced a combination of complexity, rigor and elegance that was otherwise unattainable. The power and beauty of this approach was striking."*  
(Schumacher 2012, p. 619)

*Otto Frei - Stadio olimpico di Monaco, 1972. Vista superiore delle tensostrutture dell'Olympiapark di Monaco dall'Olympiaturm. A destra: Olympia Halle, a sinistra: Schwimmballe. (fonte: Casabella)*

*"[Otto Frei] ha utilizzato i processi fisici come simulazioni e meccanismi di progettazione per "trovare" la forma piuttosto che per disegnare forme convenzionali o inventate. L'intrinseca legittimità dei processi fisici impegnati ha prodotto una combinazione di complessità, rigore ed eleganza altrimenti irraggiungibile. La potenza e la bellezza di questo approccio sono state sorprendenti."*

Con l'avvento della Digital Turn carpiana – dunque con l'accessibilità sempre maggiore di flessibili metodi di produzione di digital fabrication e la nascita di software di modellazione spline “guidati dal parametro” – il computational design trovò perfetta espressione nella nascente corrente architettonica del parametricismo. Questo è dovuto al fatto che la progettazione computazionale dimostrò l'enorme vantaggio di poter svolgere modifiche immediate alla “storia” della modellazione di un artefatto architettonico: quest'ultimo, essendo descritto esclusivamente da elementi basati su parametri, può mutare la sua natura in maniera estremamente più immediata e dinamica rispetto alle possibilità offerte dalla progettazione tradizionale. Schumacher afferma infatti che tale metodo di progettazione architettonica si basa su una auto ipotesi, per la quale tutti i componenti architettonici progettati sono interconnessi tra loro e la modifica di un singolo elemento influenza le caratteristiche di tutto l'insieme (Schumacher 2011). Questo sistema autoreferenziale nega di fatto la standardizzazione e ripetizione seriale degli elementi costruttivi – punto di forza del movimento moderno – puntando totalmente sulla flessibilità del computational design e sulle potenzialità di produzione delle nuove tecnologie legate alla fabbricazione digitale. Seppur il parametricismo possa

essere espresso in differenti linguaggi architettonici – in quanto tecnicamente descriverebbe solamente un metodo di progettazione, e non uno stile architettonico – di fatto esso è stato monopolizzato da una tendenza architettonica che fa della continuità delle superfici il suo punto focale: al contrario della serialità architettonica moderna dettata dagli angoli retti – dunque da interruzioni di superfici – l'architettura continua sfrutta appieno il potenziale di calcolo dei software di modellazione spline e si contrappone al tempo stesso alle geometrie nette ed “giocose” del postmodernismo. Questa tendenza stilistica - di cui comunque si discuterà delle sue criticità più approfonditamente nel successivo paragrafo – ha dimostrato di poter sviluppare un livello di complessità irraggiungibile dalla progettazione tradizionale, non tanto per il risultato formale finale ottenibile – basti pensare che il Terminal 5 John F. Kennedy venne completato nel 1962, ben prima anche solo del disegno assistito al computer – ma per il fatto che le forme architettoniche ottenibili non sono decretate dalla mano di un architetto, ma dalle necessità dichiarate dal progetto ed espresse sotto forma di parametri.



Eero Saarinen - Terminal 5, New York, 1962.  
(fonte: Ezra Stoller Photographer)

## 3.3 I limiti dell'architettura continua

Nella quasi totalità delle opere realizzate dall'uomo – sin dalle più primitive – il concetto di architettura si basava sull'assemblaggio di elementi indipendenti chiari che evidenziavano, a risultato ultimato, una chiara lettura statica dell'opera. Gli archetipi che per primi evidenziarono tale composizione sono chiaramente le prime strutture trilitiche preistoriche, che di fatto – a livello di lettura della struttura – non variavano troppo dalle successive più raffinate strutture ellenistiche che diedero a loro volta vita ai noti ordini architettonici. Un approccio opposto a questo, il quale potrebbe essere definito come “aggregativo”, pur essendo utilizzato in maniera estremamente minore dalla civiltà umana è quello esemplificato dalla Chiesa di San Giorgio a Lalibela in

Etiopia o dalle ben più note opere architettoniche del sito archeologico di Petra in Giordania: in questi casi infatti l'operazione svolta è l'opposta di quella aggregativa, in quanto sono architetture monolitiche scolpite nella stessa porzione di roccia. Questi sono forse gli esempi meglio riusciti dall'uomo per quando si parla di architettura continua: non si tratta di processi additivi, bensì di esclusive operazioni sottrattive, un approccio che Wölfflin definisce - nel suo caso riferendosi al periodo barocco - come un metodo di modellazione scultorea di una massa unitaria, permettendo di costruire lo spazio attraverso piegatura, deformazione e morphing. Al contrario del periodo Rinascimentale, durante il quale le facciate erano dettate da una composizione di parti indi-

pendenti e dipendenti come, per esempio, la sezione centrale dominante delle facciate delle chiese a cui venivano affiancate due corpi subordinati ai lati, “Il Barocco non poteva permettere alle parti di esistere in modo indipendente; tutto rimaneva racchiuso nella massa dell'insieme”.

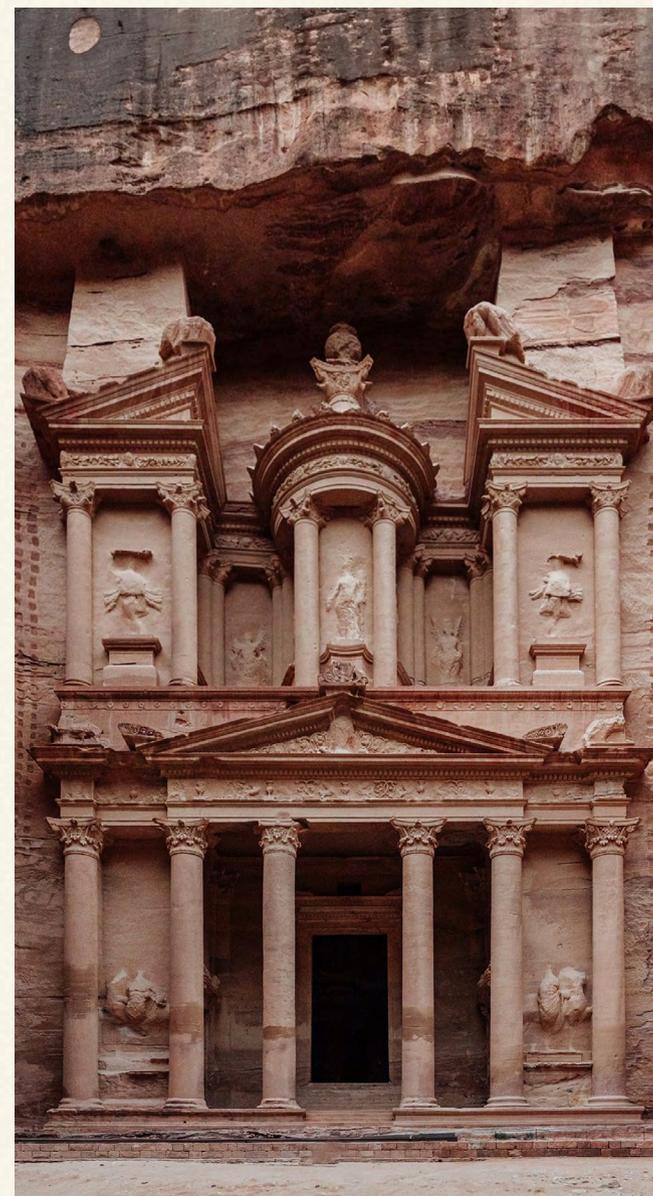
*“The baroque could not allow the parts to exist independently; everything remained enclosed in the mass of the whole.”*  
(Wölfflin, 1961, p. 100).

Non è necessario sottolineare che chiaramente Wölfflin si riferisce a questa continuità non da un punto di vista fisico ma compositivo, in quanto le opere barocche europee erano tutte basate su un processo aggregativo degli elementi. Le opere monolitiche di Petra e la Chiesa di San Carlo alle Quattro Fontane di Borromini però sottintendevano la medesima vocazione scultorea: nel primo caso tale vocazione era espressa fisicamente per necessità delle materie prime con lo scavo di un blocco monolitico di pietra, nel secondo il desiderio era espresso da una composizione che mirava a piegare lo spazio, come se l'architrave della nota facciata barocca non fosse la pietrificazione della lineare trave lignea di ellenistica memoria, ma fosse un blocco di marmo da cui uno scalpello può

far generare forme vive ed organiche. Le tendenze opposte, ossia quella “continua” e quella “aggregativa”, comunque ebbero differenti declinazioni e con vari gradi di intensità durante il corso della storia: curiosamente, comunque, le opere continue più “radicali”, come il caso di Petra o la chiesa di San Giorgio in Etiopia, furono comunque sempre influenzate dall'architettura “aggregativa”, quella più prevalente che produsse gli ordini architettonici. In entrambi i casi infatti furono riprodotti architravi, colonne, persino capitelli, pur non necessitando affatto di questa differenziazione formale in quanto tutti gli elementi erano stati ricavati dal medesimo blocco monolitico di pietra.



Francesco Borromini - San Carlo alle Quattro Fontane, Roma, 2023.  
(fonte: Chora Projects)



Khazneh el-Far'oun, Sito archeologico di Petra, 2023.  
(fonte: Brooke Buchanan photographer)

Come già accennato nel precedente capitolo, l'architettura continua prese un rinnovato interesse o, meglio, una nuova espressione, con lo sviluppo di nuove tecnologie e software alla fine degli anni '90. La volontà dell'architettura parametrica cominciò a tendere sempre più maggiormente a degli oggetti senza cuciture, continui e che generassero delle superfici stirate, piegate e compresse senza che si "rompessero". Vi sono moltissimi studi di architettura che durante gli anni '10 del nuovo millennio fecero di questa tendenza una sorta di firma, e sarebbe scorretto in questo caso non citare l'eccezionale lavoro svolto da Zaha Hadid Architects durante questo decennio. I progetti prodotti da ZHA hanno raggiunto probabilmente l'apice di quello che il digital fabrication e computational design potevano offrire dal punto di vista della continuità: Se il Borromini seicentesco si "limitava" alla deformazione spaziale di travi e setti murari, i progetti di Zaha Hadid mettono in discussione i più reconditi archetipici concetti statici e formali dell'architettura, rendendo -come nel caso del Centro Culturale Heydar Aliyev a Baku, in Azerbaigian – soletta, muro e copertura un'unica superficie conti-

nua avvolta su sé stessa.

Lo straordinario risultato formale, comunque, pur tendendo al continuo è ancora limitato dalle attuali tecnologie: nonostante vi sia una forte enfasi compositiva verso un'unica superficie senza bordi, questi elementi senza limiti sono comunque composti da parti separate tra loro. Ciò significa che – trattandosi di superfici complesse a doppia curvatura – ogni elemento è unico e la sua posizione nello spazio è definita e non può essere cambiata; paradossalmente, nella progettazione di questi edifici formalmente continui, uno dei processi essenziali più onerosi è proprio la discretizzazione della geometria e successiva clusterizzazione, dato che chiaramente le pannellature che descrivono queste superfici a doppia curvatura rimangono comunque planari (Pottmann, Brell-Cokcan, and Wallner 2006). Il risultato di queste continuità porta dunque ad avere edifici "statici": "Nonostante siano generati da complessi algoritmi dinamici che simulano processi emergenti aperti, gli artefatti risultanti sono solo un momento congelato di tali processi e non si prestano all'adattabilità dinamica e alla trasformabilità attese da sistemi veramente digitali."

*"Despite being generated by complex dynamic algorithms simulating open emergent processes, the resulting artefacts are just a frozen moment of such processes, and do not yield themselves to the dynamic adaptability and transformability expected from truly digital systems."*

(Rossi 2023, p. 10)

Di fatto, se i mezzi di produzione digitale utilizzati dagli architetti nei precedenti due decenni avevano dimostrato fortemente il loro potenziale in termini di versatilità e variazione, questo venne meno con le corrispettive architetture digitali: ritenute quest'ultime ancora troppo ancorate a un'idea "analogica" dell'architettura (in questo caso analogico inteso come contrapposizione alla riprocessazione tipica dei sistemi digitali), nello scorso decennio iniziarono ad esserci differenti correnti che iniziarono a criticare la soluzione di architettura continua promossa precedentemente: questa nuova generazione di architetti e ricercatori - definita da Carpo come il "Second Digital Turn in Architecture" (Carpo, 2017) - iniziò a mettere in discussione le contraddizioni del formalismo continuo e promuovendo al tempo stesso un nuovo paradigma all'interno del design computazionale e della fabbricazione digitale. Questo gruppo eterogeneo di accademici e professionisti iniziò a indagare la possibilità di offrire nuovo metodo progettuale che non trattasse componenti descritte dalla propria funzionalità (come trave sta a carico orizzontale e pilastro sta a ca-

rico verticale) ma che si avvalessero invece di componenti generiche, del tutto simili a dei pixel di un'immagine (o a dei voxel, la versione "tridimensionale" dei pixel), che permettessero di sviluppare architetture riconfigurabili in base alle differenti connessioni di questi elementi.

A seguito di questa estremamente generica descrizione potrebbe venire in mente il termine di modularità, o architettura modulare. Chiaramente questo metodo di progettazione non nasce nello scorso decennio ed è anzi figlia prediletta dell'industrializzazione del XX secolo di cui si è ampiamente parlato nel Capitolo 2, oltre ad avere radici direttamente con il mondo ellenistico. Per tale motivo è necessario analizzare correttamente l'evoluzione storica e le varie declinazioni che il termine "modulare" ha delineato negli scorsi secoli anni nell'ambito architettonico, per comprendere appieno l'accezione di tale termine nel contesto della Seconda Svoltata Digitale.



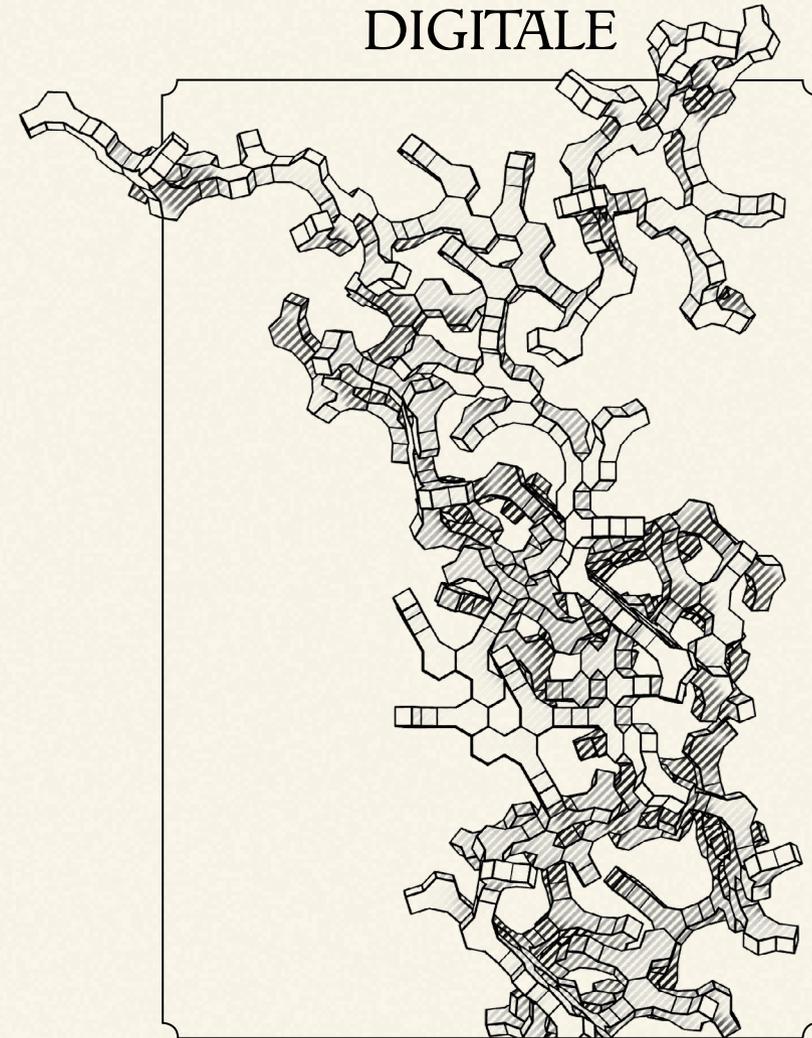
*Zaha Hadid Architects - Centro Culturale Heydar Aliyev, Baku, 2012.  
(fonte: Zaha Hadid Architects)*



*Zaha Hadid Architects - Centro Culturale Heydar Aliyev, Baku, 2012.  
(fonte: Zaha Hadid Architects)*

- Capitolo IV -

## LA STANDARDIZZAZIONE DIGITALE



## 4.1 Le declinazioni della modularità

Nonostante l'utilizzo del termine "modulare" sia relativamente recente nel mondo dell'architettura - in quanto secondo l'Oxford English Dictionary venne utilizzato per la prima volta nel volume "The Evolving House" di Bemis del 1933 (Russel 2012, p. 261) - l'applicazione effettiva del concetto di modularità ha origine millenarie; Andrea Rossi, ricercatore presso la Digital Design Unit di TU Darmstadt, definisce nella sua tesi di dottorato "Mediated Assemblies An Open Source Software Approach to Combinatorial Design and Fabrication" (Rossi 2023) due concetti paralleli e indipendenti che trattano il termine "modulare". Il primo fa riferimento ad un'idea di architettura "[...] come composizione tra le parti basata sulla regola matema-

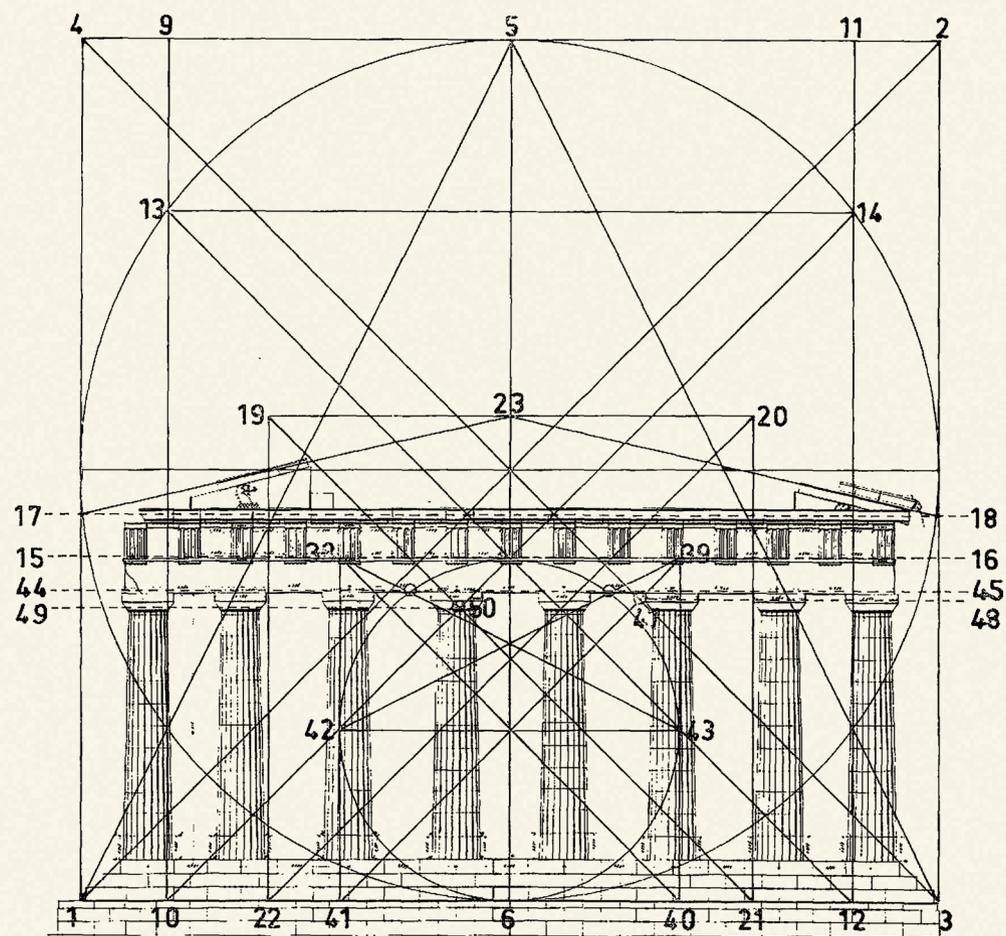
tica di un modulo condiviso, che è quella di garantire coesione e l'armonia dell'insieme" (Rossi 2023, p. 24) mentre la seconda fa riferimento al mondo dell'edilizia industrializzata, all'interno del quale il concetto di modulo prende valore da un punto di vista tecnologico (e non teorico, come nel primo caso) per la coordinazione della costruzione.

Riferendosi al primo caso, ossia la modularità architettonica "teorica", è quasi banale sottolineare di come l'architettura classica greca e romana sia fondata saldamente su di essa: il modulo è la principale metodologia per il raggiungimento dell'armonia dell'insieme (Alberti 1451) e gli esempi più eclatanti di questa teoria sono senza dubbio i templi greci, le cui

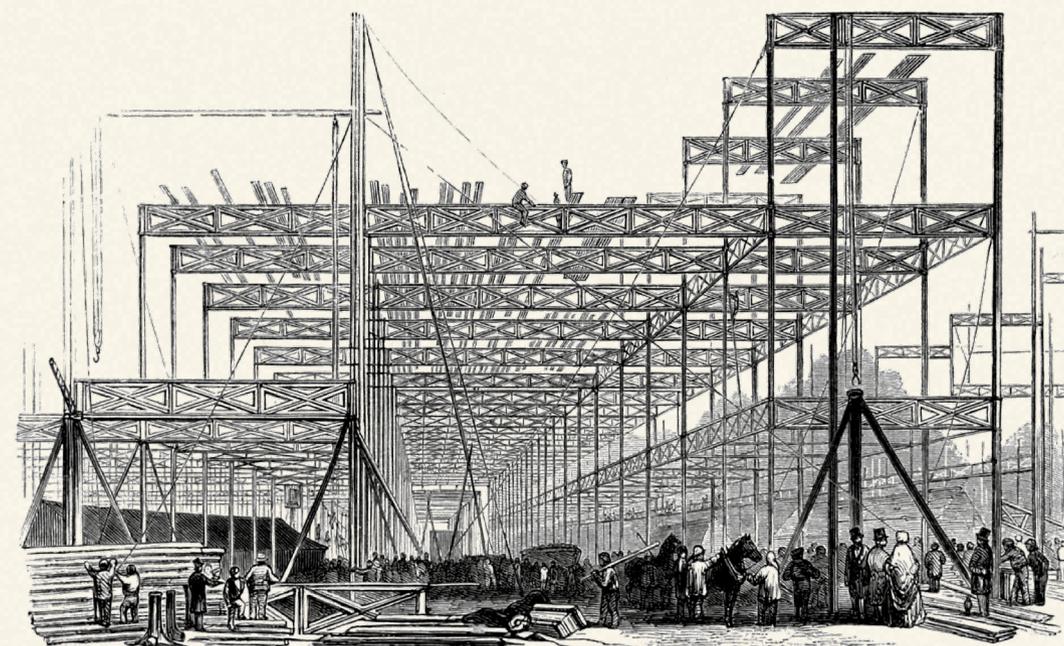
altezze di colonne, interassi e dimensionamento degli elementi decorativi erano sempre rapportate proporzionalmente a multipli o sottomultipli del diametro della colonna (Watkin e Clerici 1999, pp. 16-32). La particolarità dell'utilizzo del modulo nell'architettura classica risiedeva nel fatto che esso era un sistema chiuso: la finalità del modulo con accezione "classica" era di produrre artefatti completi senza la possibilità di rimuovere o aggiungere parti; l'utilizzo del modulo, dunque, era da intendersi per raggiungimento compositivo dell'armonia tra le parti, trattando dunque una questione puramente teorica e figurativa.

Nella seconda accezione invece - ossia quella che fa riferimento ad una sorta di modularità architettonica "industriale" - l'interesse del modulo cresce per una questione più tecnica e coordinativa. La sfida del XIX secolo per i progettisti risiedeva nel fatto che fosse necessario costruire edifici che mai erano stati costruiti prima. Un Vitruvio, Alberti o Palladio non lasciarono scritti su come dovesse essere costruita una stazione ferroviaria o un capannone industriale e dunque gli architetti e ingegneri dell'epoca dovettero iniziare a comprendere come approcciare da un punto di vista progettuale queste nuove tipologie architettoniche. La rivoluzione industriale, che produsse queste nuove ne-

cessità di spazi, produsse fortunatamente anche i componenti per poterli costruire: sotto stimolo dei nuovi elementi costruttivi standardizzati prodotti dalle industrie, il mondo delle costruzioni iniziò a dover comprendere come utilizzare questi prodotti per le nuove esigenze, e in questa nuova scala di complessità - in cui i volumi e le campate richieste crescevano a ritmi serrati - l'utilizzo della modularità fu uno strumento essenziale per la produzione degli elementi costruttivi e la coordinazione del montaggio delle strutture. In questo caso la modularità non era figlia esclusivamente delle richieste degli ingegneri per "digerire" più facilmente queste nuove opere architettoniche straordinarie, ma essa era anche chiaramente stimolata dai processi produttivi industriali matriciali, di cui è stato ampiamente discusso nel Capitolo 2. L'esempio principe in questo caso che descrive perfettamente il connubio tra la necessità di razionalizzare l'estrema complessità di un'opera e lo stimolo nell'utilizzare i nuovi elementi prodotti dall'industria è senza dubbio il Crystal Palace di Joseph Paxton del 1851: la griglia modulare di acciaio e vetro era dettata dalla dimensione massima di pannelli di vetro che l'industria riusciva ad offrire all'epoca (Jessee e Rourke 2001) e la scelta di tale modularità fu una soluzione vincente da un punto di vista economico e di cantierizzazione,



*Analisi geometrica del Partenone di Tons Brunés.  
(fonte: Brunés 1967, p. 304)*



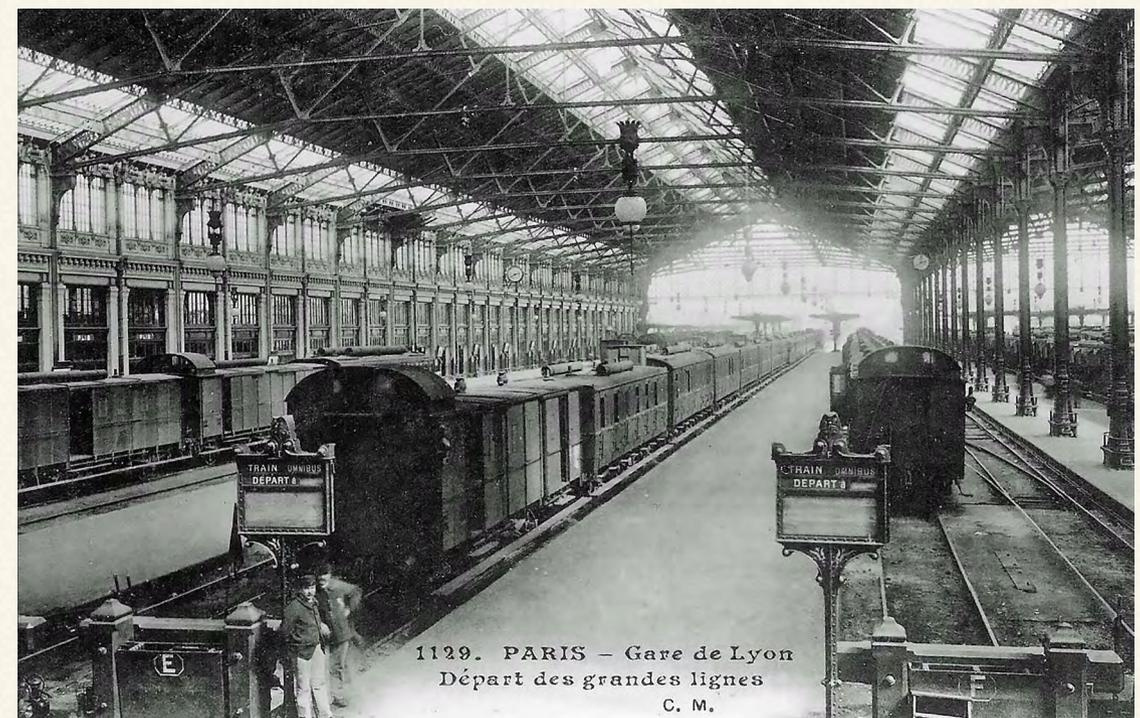
*Joseph Paxton - Crystal Palace, incisione mostrante lo stato di avanzamento  
della cantieristica.  
(fonte: Berlyn 1851, p. 68)*

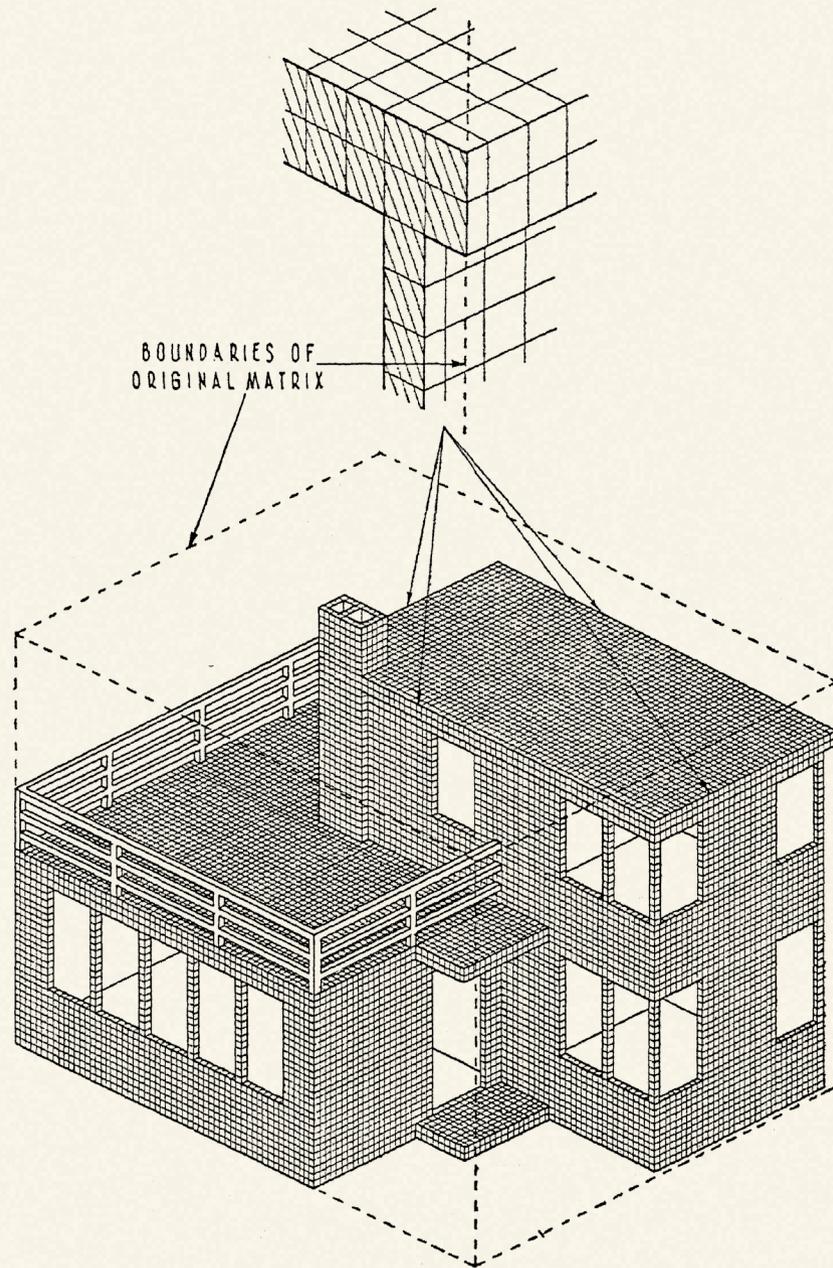
in quanto nonostante la dimensione fuori scala per l'epoca i costi e tempi di costruzione del Palazzo di Cristallo furono estremamente bassi per l'epoca (Addis 2006). Quest'opera è forse ciò che meglio ha esemplificato la necessità di avvalersi della modularità con una accezione industriale: la modularità in questo caso non era utilizzata esclusivamente per una motivazione progettuale – come nel caso del diametro della colonna – ma più maggiormente per una questione di controllo della complessità ed efficientamento delle economie di scala.

Curiosamente questa differente accezione tra modularità “teorica” e “industriale” è rappresentata fisicamente proprio da queste prime tipologie di edifici ottocenteschi: in questi casi, infatti, la nozione di “modularità industriale” non era stata ancora assimilata propriamente dalla professione architettonica e veniva dunque relegata alle porzioni di edificio sotto maggiore influenza tecnica degli ingegneri. La collaborazione tra architetti e ingegneri risultava dunque con una forte dicotomia progettuale di questi primi edifici: facciate finemente decorate e ornate dagli architetti formati alle Ecoles des Beaux Arts con capitelli e stucature – la modularità “teorica” della proporzione e dell'armonia – e spazi interni espressi da luci di decine

di metri con putrelle in acciaio e tamponature in vetro. La celebre stazione ferroviaria Gare de Lyon attuale, progettata nel 1895 dall'architetto Marius Toudoire, esemplifica perfettamente questi due mondi opposti di architettura e ingegneria: la facciata del capolinea propone una soluzione eclettica che unisce le coperture dei Châteaux francesi del XVII secolo e una torre dell'orologio in un risultato estremamente massivo, mentre ventre che accoglie le carrozze è strutturato da uno scheletro di acciaio e vetro in cui la leggerezza ne fa da padrone.

*Marius Toudoire - Gare de Lyon, carte postali mostranti la facciata esterna e l'accoglienza interna delle locomotive, ca. 1895-1910. (fonte: Compagnie de chemin de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée)*





Albert Farwell Bemis  
- schema concettuale  
della struttura  
della casa definita  
all'interno della  
matrice, 1936.  
(fonte: *The Evolving  
House*, p. 73)

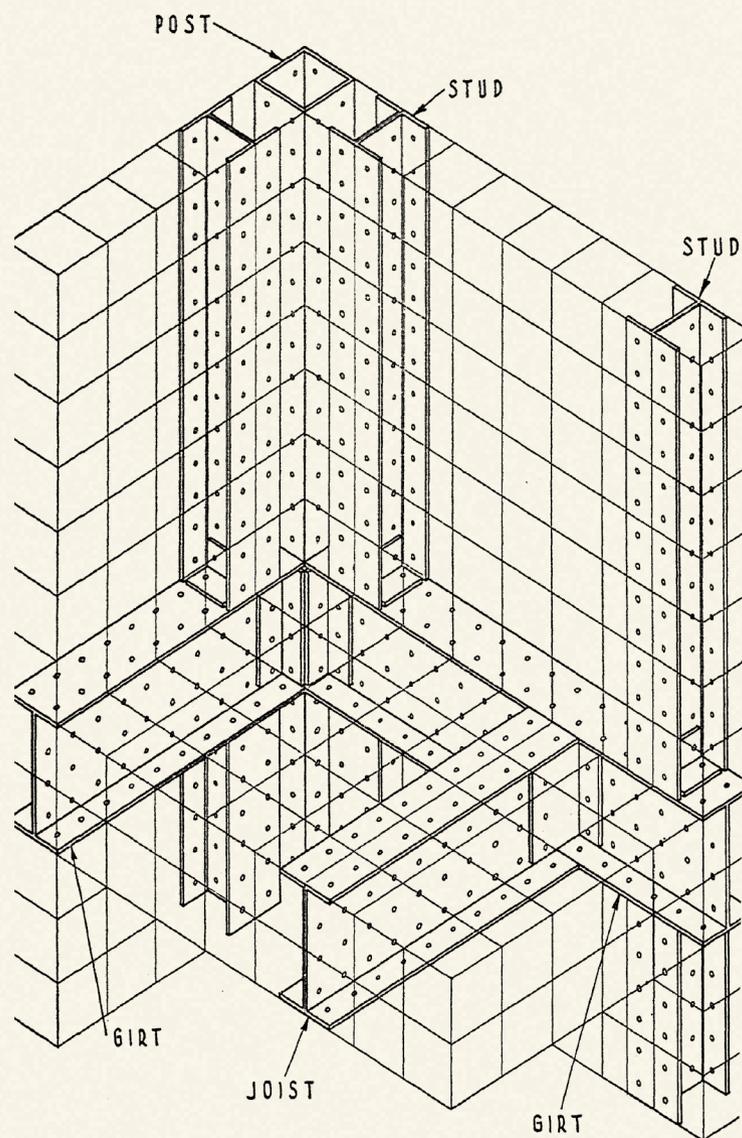
Negli ultimi decenni del XIX, durante la grandeur della rivoluzione industriale, non vi fu comunque un chiaro dibattito nel campo architettonico su ciò che significasse modulare e le sue varie declinazioni: curiosamente - come sottolineato a inizio capitolo dall'Oxford English Dictionary - è da attribuire a un non-architetto la definizione del termine "modularità" nell'ambito della progettazione e costruzione. Albert Farwell Bemis (1870-1936), imprenditore formatosi come ingegnere civile al MIT, dedicò la sua carriera per la modernizzazione del settore edile attraverso lo sviluppo di metodi di progettazione e coordinazione alla costruzione che si fondassero su dimensioni standardizzate basate su principi modulari (Russell, 2012).

Alla base di tale approccio vi era l'utilizzo di un modulo cubico da quattro pollici, il quale aveva l'obiettivo di diventare una nuova unità di misura per il dimensionamento di tutti gli elementi architettonici (Bemis, 1936): vi è da sottolineare il fatto che l'imprenditore statunitense non stesse immaginando un'architettura prodotta da cubi di quattro pollici, ma che intendesse tale modulo come "[...] la base per il coordinamento dimensionale di diverse parti di edificio e, attraverso questo, il coordinamento di un settore altrimenti frammentato e disconnesso."

*"[...] a higher level thinking model for dimensional standardization, able to coordinate the exchange between different actors relying of different models of production, was necessary to achieve the advancements that were hoped for architecture and construction."*

(Rossi, 2023. p. 32)

L'interesse dell'utilizzo di un modulo cubico non nasceva da necessità prettamente compositive o architettoniche, ma coinvolgeva piuttosto preoccupazione pratiche: l'idea di Bemis, infatti, risiedeva nel fatto che fosse necessaria la standardizzazione delle unità di misura per il coordinamento dello scambio di informazioni tra i diversi attori del mondo edilizio, cercando di trovare un linguaggio univoco che permettesse di raggruppare i differenti modelli di produzione sotto un'unica linea progettuale.



Albert Farwell Bemis  
- schema concettuale  
della struttura  
portante in acciaio  
all'interno della  
matrice, 1936.  
(fonte: *The Evolving  
House*, p. 154)

A seguito della prematura morte dell'imprenditore nel 1936, altri organi legislativi tentarono di perseguire i suoi obiettivi di standardizzazione, tra i quali è necessario menzionare il comitato A62 per il "Coordinamento delle dimensioni dei materiali e delle attrezzature da costruzione" promosso dall'American Standard Association: nonostante le differenti linee guida e norme promulgate, aggiuntesi alle numerose pubblicazioni già svolte da Bemis, l'adozione di questi principi fu estremamente limitata e, paradossalmente, negli anni successivi alla Seconda Guerra Mondiale il settore edilizio promotore della prefabbricazione e modularità virò sempre più maggiormente verso la prefabbricazione di interi edifici attraverso sistemi chiusi proprietari – per giunta nella maggioranza dei casi incompatibili tra loro - in direzione opposta al sistema aperto ideato da Bemis.

*"By the 1970s, however, "modular housing" had become little more than a synonym—or, even worse, a branding and marketing slogan—for prefabrication that did not necessarily use a four-inch module [...] since builders were under no legal obligation to design on an "open system" (Russell, 2012, p. 269)*

*"Negli anni '70, tuttavia, "abitazioni modulari" erano diventate poco più che un sinonimo – o peggio ancora, uno slogan di marketing e di branding – per la prefabbricazione che non utilizzava necessariamente il modulo da quattro pollici [...] poiché i costruttori non erano obbligati per legge a progettare in base a un "sistema aperto" "*

—● **Warnung vor Nachahmungen.** ●—

Wie alles Gute, so wird auch das **altbewährte Hausmittel**

## Richter's Anker-Pain-Expeller

**vielfach nachgeahmt.** Da wir nur für die Güte **unseres echten**, unter **ärztlicher** Aufsicht bereiteten Pain-Expellers garantieren können, so wolle man beim Einkauf nur Flaschen mit der Fabrikmarke „Anker“ annehmen und Verpackungen ohne rothen Anker als unecht scharf zurückweisen. Zum Preise von 40 und 70 kr. vorrätig in allen Apotheken. — Aerztliche Urtheile über den Pain-Expeller findet man in dem illustrierten Buche „Guter Rath ist Goldes werth“. Dasselbe wird auf Verlangen gratis und franco versandt durch Richter's Verlags-Anstalt in Leipzig; man schreibe eine Correspondenz-Karte.

**F. Ad. Richter & Cie.**

---

### Des Kindes liebstes Spiel!



So lautet der Titel eines mit vielen farbenprächtigen Abbildungen versehenen Buches, das auf Verlangen von der unterzeichneten Firma gratis und franko übersandt wird. Aus den beigedruckten zahlreichen Dankschreiben geht hervor, das die berühmten

● **Anker-Steinbaukasten** ●

in der That das beste Spiel- und Beschäftigungsmittel für Kinder in jedem Alter sind. Der Erfolg ist ein **über-raschender**, wie jeder bestätigen wird, der gesehen hat, mit welchem Eifer die Kinder **immer und immer wieder mit den farbigen Steinen** bauen. Man hüte sich vor **werthlosen Nachahmungen** und achte auf **nebenstehende Fabrikmarke**. Die Anker-Steinbaukasten sind von 70 kr. bis fl. 5 — und höher in allen feineren Spielwaaren-Geschäften der Welt vorrätig.

**F. AD. RICHTER & CIE.**

Erste österreichisch-ungarische u. s. i. priv. Steinbaukasten-Fabrik  
**WIEN, I. Nibelungengasse Nr. 4,**  
 Budapest (Thüringen), Nürnberg, Olten  
 (Schweiz), Rotterdam, London E. C., 66  
 Penchurch-Street, New-York, 310  
 Broadway

*Articolo pubblicitario di giornale del sistema di blocchi da costruzione giocattolo Anker-Steinbaukasten, 1891. (fonte: Topographisch-statistischer Schematismus des Grossgrundbesitzes im Königreiche Böhmen, p. 834)*

Parallelamente a ciò che Bemis stava provando a rivoluzionare nel settore edile statunitense nei primi decenni del XX secolo, nel continente europeo il Movimento Moderno tentava in qualche maniera a suggellare i principi e significati della modularità “teorica” e “industriale”, ancora in parte incastrata all’eclettismo ottocentesco: il compito del movimento moderno era infatti quello di produrre un’architettura che fosse all’altezza delle necessità della nuova società di massa industrializzata. Se l’eclettismo poteva sembrare una sorta di pezza, una sorta di approccio architettonico senza guida che non aveva ancora compreso correttamente quello che da lì a breve sarebbe diventata la società del futuro - o forse è esattamente la corrente perfetta che esemplificava architettonicamente quello che era il rivoluzionario periodo di transizione della società occidentale - il movimento moderno sembra quasi la perfetta descrizione materica di ciò che è stato il Secolo Breve (Hobsbawm 1995) e la società consumistica e industrializzata che lo ha caratterizzato. La figura che infatti più si occupò della modularità in architettura su senz’altro Walter Gropius, il quale dedicò parte della sua carriera nella ricerca di differenti metodi costruttivi modulari che potessero unire la flessibilità di un sistema aperto con le potenzialità dei metodi produttivi industriali. Il

concetto è perfettamente riassunto nelle parole dello stesso Gropius, il quale affermava nel 1922 di puntare a “[...] una casa composta da pezzi variabili, che vengono prodotti in stock e possono essere assemblati in modo combinatorio, diciamo, alla maniera di un Anker-Steinkasten, ma solo su larga scala”.

*“A house made up of variable set pieces, that are produced in stock and can be put together in a combinatorial way, say, in the manner of an Anker-Steinkasten, but only on a large scale.”*  
 (Gropius 1922, pp. 3, 6)

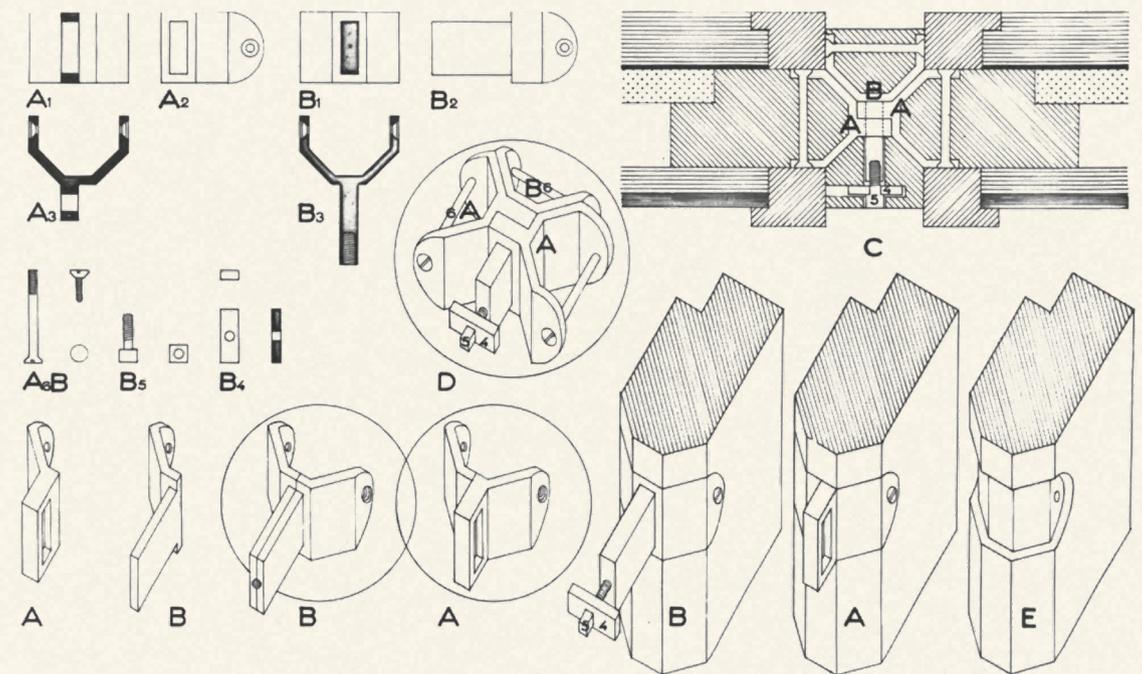
Il sistema Anker-Steinkasten a cui l’architetto tedesco faceva riferimento era il più famoso kit di costruzione giocattolo allora disponibile: inventato negli anni ’70 dell’800 dai fratelli Otto e Hustav Lilienthal, tale sistema permetteva tramite l’uso dei blocchi Anker – ossia delle forme geometriche elementari composte da un agglomerato di sabbia, gesso e olio di lino, pressate e successivamente cotte – di assemblare composizioni architettoniche complesse tramite gli specifici manuali forniti, il tutto senza l’utilizzo alcuno di colle o fissaggi (Noschka e Knerr 1986, pp. 51-61). La figura che per prima ideò il concetto di kit di costruzione come giocat-

tolo fu quella dell'educatore tedesco Friedrich Fröbel, il quale ebbe una tale influenza nel movimento moderno e specialmente nella corrente del Bauhaus che lo stesso Gropius e Adolf Meyer progettano un edificio dedicato a lui in occasione del suo settantacinquesimo anniversario della sua morte, il Friedrich-Fröbel House in Bad Liebenstein, purtroppo rimasto a stadio di progetto (Nerdinger 1985, pp. 66-67). Ispirato dunque dalle teorie pedagogiche di Fröbel e da uno dei primi sistemi aperti di assemblaggio – seppur alla scala di giocattolo – Gropius assieme ai suoi colleghi iniziò a indagare possibili sistemi costruttivi modulari alla scala architettonica: alcuni dei risultati furono il “Sistema a Nido d’Ape” (Wabenbau), in collaborazione con Fred Forbat, e il “Grande kit di costruzione” (Baukasten im Großen), sviluppato con Adolf Meyer, rispettivamente del 1922 e 1923, permettevano la una tipizzazione cellulare delle unità abitative secondo una specifica gerarchizzazione dei moduli e seguendo le specifiche necessità degli abitanti (Gropius 1925, pp. 8-11).

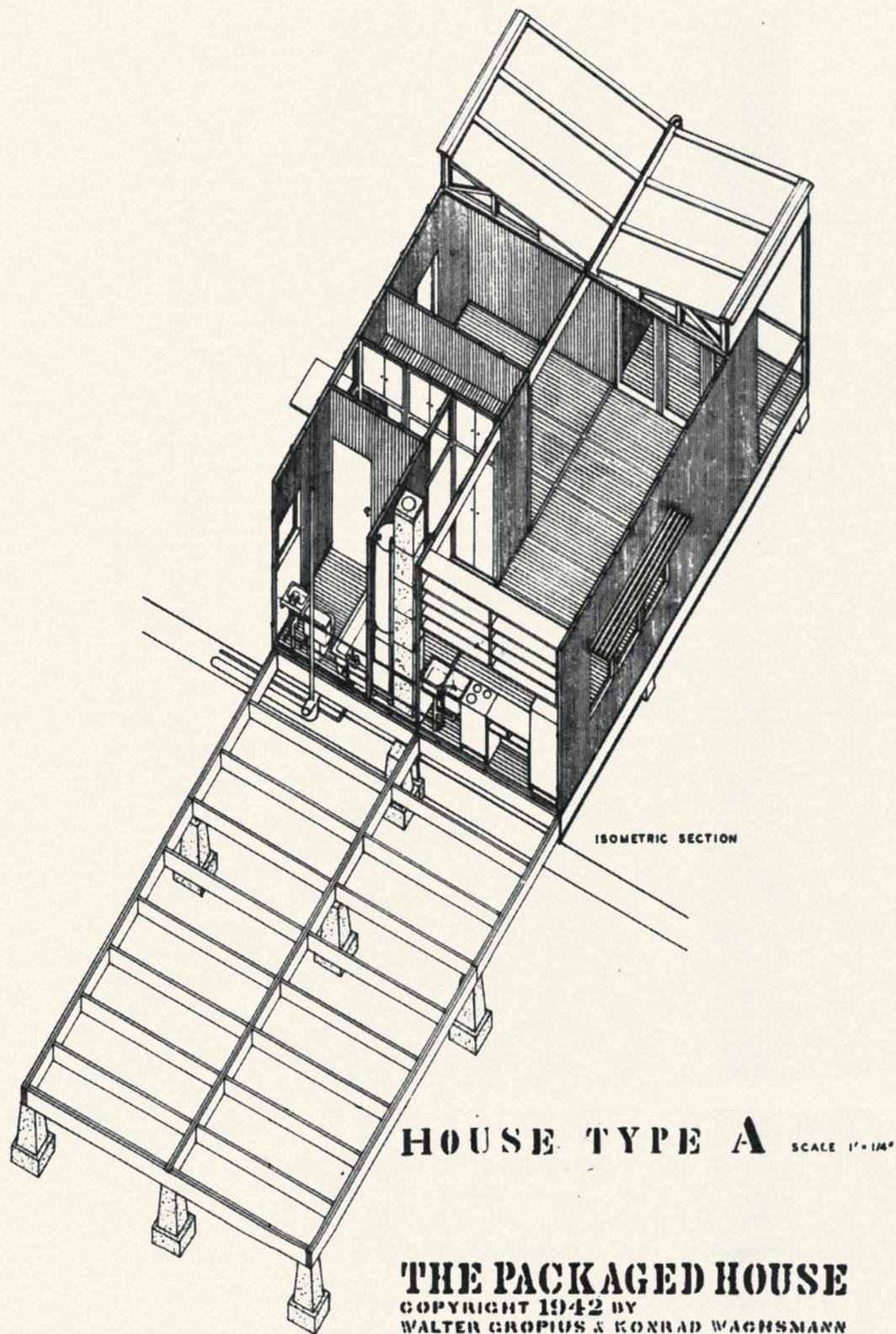
Il progetto forse più rilevante della carriera di Gropius nell'ambito dell'architettura modulare fu quello in collaborazione con Konrad Wachsmann – il quale dedicò anche lui gran parte della sua carriera nella ricerca della modularità architettonica - riguar-

dante il sistema “Packaged House” (Herbert 1984). Tra il 1941 e 1952 i due architetti tedeschi naturalizzati statunitensi fondarono la General Panel Company il cui obiettivo era la promozione e produzione di un sistema modulare costruttivo universale composto da pannelli portanti e assemblati a secco da un unico giunto, permettendo di generare una griglia rettilinea tridimensionale. L'obiettivo del progetto – basato su un prototipo di Wachsmann sviluppato prima del suo arrivo negli Stati Uniti e successivamente implementato da Gropius - era di offrire un kit di costruzione universale che contenesse tutti gli elementi per la costruzione di singole unità abitative configurabili individualmente, la cui struttura era composta da un sistema di pannelli con telaio in legno connessi spazialmente da ganci a Y.

La rivoluzione – e, di fatto, causa della successiva rovina – del sistema ideato consisteva nel fatto che l'obiettivo fondamentale del Packaged House e della General Panel Company era l'esclusivo sviluppo di un insieme universale di componenti, i quali sarebbero stati i prodotti da immettere sul mercato. Questa caratteristica segnò un forte distacco rispetto alle aziende concorrenti dello stesso periodo che iniziarono ad occuparsi di immobili prefabbricati ed il cui obiettivo era invece la commer-



Konrad Wachsmann  
- proposta di sistema  
a secco modulare,  
dettaglio tecnologico  
della connessione a Y  
metallica, 1941.  
(fonte: Herbert 1984,  
p. 250)



**HOUSE TYPE A** SCALE 1"=1M"  
**THE PACKAGED HOUSE**  
 COPYRIGHT 1942 BY  
 WALTER GROPIUS & KONRAD WACHSMANN

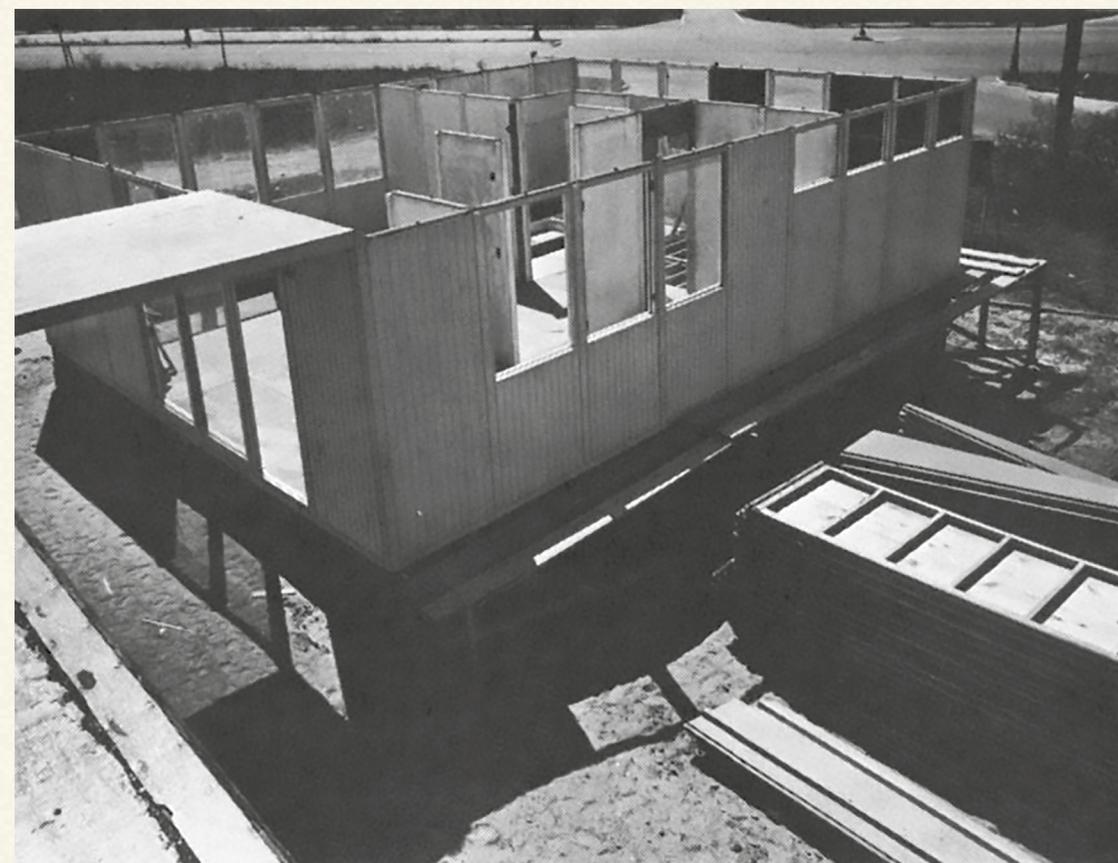
cializzazione di interi manufatti abitativi anziché il sistema costruttivo e i suoi elementi. La volontà di vendere il kit costruttivo come prodotto sul mercato - anziché l'immobile - nacque dal fatto che Wachsmann si occupò dello sviluppo delle differenti macchine personalizzate per la produzione degli elementi unici del kit, di fatto creando un impianto produttivo personalizzato dedicato interamente alla produzione di tali componenti. Il sistema proposto, di fatto, si scontrò con gli approcci finanziari e di marketing dell'epoca: esso infatti, a causa della sua caratteristica legata alla flessibilità e apertura del sistema, portava il sistema strutturale risultante a necessitare di un'elevata precisione e ad essere estremamente ridondante; dunque, unito al fatto di necessitare di un impianto di produzione personalizzato, i costi generali erano mediamente più alti rispetto alla concorrenza che si occupava di prefabbricazione, e in un periodo nel quale il concetto di prefabbricazione stava diventando sempre più sinonimo di prodotto finale "chiavi in mano" legate a soluzioni abitative a basso costo - spesso anche di bassa qualità - il sistema progettuale faticò a decollare (Rossi, 2023). Pur avendo posto una notevole attenzione dal punto di vista di ricerca nello sviluppo dei connettori dei pannelli - i quali furono per la prima volta oggetto di una ricerca dettagliata

e sistematica - vennero costruite solamente circa 150-200 unità abitative, provocando il successivo fallimento della General Panel Corporation fondata ed ideata esclusivamente per la produzione di tale sistema costruttivo. (Seelow, 2018). La ricerca di Gropius verso un sistema modulare aperto si arenò dunque post Seconda Guerra Mondiale, complice anche del fatto che tale soluzione di modularità "industriale" ebbe meno successo nel dibattito architettonico rispetto alla modularità "teorica", che in quegli anni era stata riproposta in nuova forma con il Modulor di Le Corbusier. L'applicazione della modularità aperta gropiusiana rimase ferma alla scala di singoli edifici pilota, ma il concetto di "casa prodotta in fabbrica" divenne sinonimo di un'architettura disumana e contribuì in parte proprio al rifiuto del modernismo di cui Gropius ne fu padre (Seelow 2018, p. 24).

*Walter Gropius e  
 Konrad Wachsmann  
 - Packaged House,  
 disegno assonometrico  
 di casa standard tipo  
 A, 1942.  
 (fonte: Herbert 1984,  
 p. 261)*



*General Panel Company - zona di fresatura, California, 1947.  
(fonte: Herbert 1984, p. 291)*



*Walter Gropius e Konrad Wachsmann - prototipo di casa della General Panel,  
New York, 1946.  
(fonte: Herbert 1984, p. 282)*

Il sistema progettuale e di business di Gropius e Wachsmann venne presto accantonato in un periodo nel quale gli Stati Uniti, a cavallo tra gli anni '50 e '60, non promossero a livello governativo forti incentivi per la prefabbricazione aperta: l'intervento statale fu relativamente tiepido nel finanziare uno sviluppo su larga scala di sistemi edilizi completi e le altre soluzioni proposte, come il "Nuovo blocco edilizio" (Carreiro 1968) furono totalmente osteggiate dai due architetti tedeschi naturalizzati sta-

tunitensi: Per Wachsmann perché personalmente più interessato ai nuovi materiali del futuro rispetto al calcestruzzo armato, mentre Gropius per il ripudio della ripetizione di grandi unità abitative, all'interno delle quali si sfruttava il potenziale meccanico senz'anima di unità identiche e vanificando la scelta e i bisogni individuali dei residenti (Herbert 1984). Lo stesso Gropius in un discorso del 1964 al Boston Architectural Center espone in maniera netta il suo totale rifiuto della direzione in cui stava vivendo l'architettura prefabbricata:

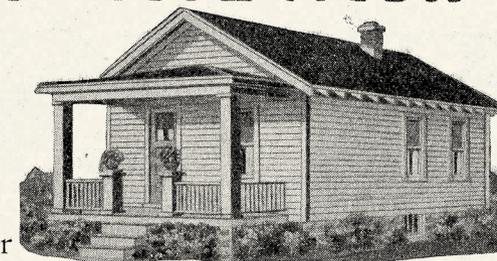
*"[...] The idea of prefabrication was seized by manufacturing firms who came up with the stifling project of mass producing whole house types instead of component parts only. The resulting monotony further deepened the horror of a nostalgic, sentimental, unguided public of a prefabricated future."*

(Gropius 1968, p.97)

*"[...] L'idea di prefabbricazione è stata presa di mira dalle aziende manifatturiere, che hanno elaborato il progetto soffocante di produrre in massa interi tipi di case anziché solo parti componenti. La monotonia che ne derivò approfondì ulteriormente l'orrore di un pubblico nostalgico, sentimentale e privo di guida per un futuro prefabbricato."*

Articolo pubblicitario di giornale della Aladdin Mill House, marzo 1932. (fonte: The Country Gentleman)

# World's Lowest Priced Quality Home!



**Price Includes** all lumber readi-cut, mill-work, windows, doors, interior woodwork, hardware, roofing, glass, nails, paints, varnish and stains. All materials shipped in a sealed box car direct from the big Aladdin Mills by **pre-paid freight**. Safe arrival guaranteed. All lumber is certified, sound, strong, and of high quality. This and all Aladdin homes are permanent, year 'round homes—warm in winter. Not "portable" or "sectional" in any sense. Many designs to choose from. \$366 to \$1688. 5 to 9 rooms. Outside porches extra. Also Summer Cottages, Garages, Filling Stations, Tourist Cottages and Roadside Stores at amazing savings.

# \$483

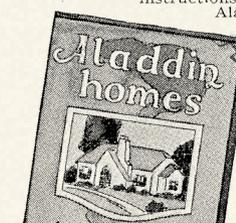
## 5 ROOMS

### Aladdin's Read-cut System Revolutionizes Home Building Methods and Costs

Buy direct from the Aladdin Mills at wholesale prices. Save 18% lumber waste and 30% labor cost. All lumber is cut-to-fit at the Mill on huge labor-saving machines, instead of on the job, where lumber and labor waste costs dearly. Complete instructions and drawings enable you to build an Aladdin yourself if you are handy with tools.



**\$1162—7 Rooms**



### Mail Coupon Today for FREE CATALOG

Send Coupon today for your **free** copy of the beautiful, new, 1932 Aladdin Catalog. Printed in full colors, profusely illustrated, and overflowing with interest. A revelation for prospective home owners. Simply clip the coupon and mail it NOW. Address nearest office. No obligation.

**THE ALADDIN COMPANY**  
Bay City Michigan

THE ALADDIN CO.—(Address nearest office)  
Bay City, Mich., Portland, Ore., Toronto, Ont., Can.

Send at once, without obligation, FREE copy of the beautiful new 1932 Aladdin Catalog of Read-cut Homes, Summer Cottages, Garages, etc., No. 347.

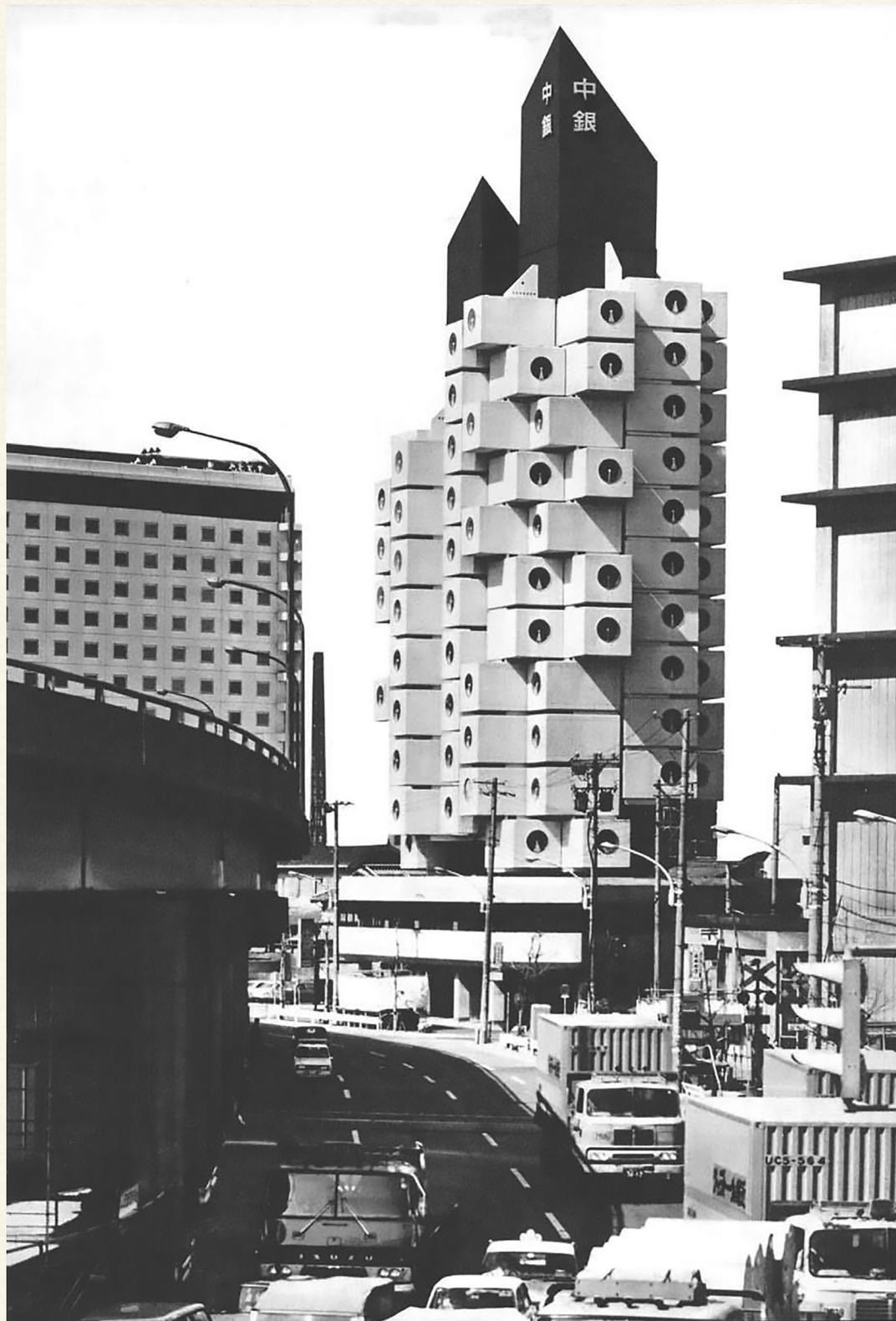
Name \_\_\_\_\_  
Address \_\_\_\_\_  
City \_\_\_\_\_ State \_\_\_\_\_



**\$552—5 Rooms**



**Garages \$92 up**



*Kishō Kurokawa -  
Nakagin Capsule  
Tower, Tokyo, 1972.  
(fonte: Domus)*

Agli inizi degli anni '60 si vennero a creare dunque due prospettive per quanto riguarda il settore della prefabbricazione: da un lato diventava sempre più comune nel continente americano la produzione di unità abitative complete basate su sistemi leggeri come il ballon frame, dall'altra una prefabbricazione su larga scala finanziata massicciamente dai governi europei basata sul calcestruzzo armato. Se da un lato il mercato statunitense non riuscì a valorizzare le numerose iniziative imprenditoriali legate alla produzione di alloggi modulari come quelli proposti dalla General Panel Company, nel continente europeo la situazione era differente: il vasto programma abitativo finanziato dai differenti governi infatti, promuovendo vasti programmi di abitativi prefabbricati, innescò un'estesa ricerca in ambito architettonico per la produzione e costruzione di sistemi modulari per grandi complessi abitativi multi unità. (Herbert 1984). Gli stati facenti parte del blocco sovietico a partire dagli anni '50 dimostrarono grande sperimentazione sotto questo punto di vista, facilitati anche dal fatto che la centralizzazione statale rendeva più agevole sia la progettazione che produzione di tali sistemi su larga scala, i quali erano anche sostenuti da una domanda interna sufficientemente ampia da poter essere attuati; curiosamente in questi contesti la tecnologia do-

minate fu il pannello prefabbricato in cemento, spinto anche dalla vasta campagna abitativa promossa da Khrushchev (Malaia 2020), la quale era concettualmente simile all'approccio proposto da Gropius con i suoi pannelli prefabbricati lignei portanti in cui non vi era necessità di telai strutturali per il contenimento dei pannelli.

La ricerca nella prefabbricazione non si limitò ai confini europei e fu anzi rivista sotto una nuova spazialità architettonica dal movimento metabolista giapponese, il cui fondatore Kishō Kurokawa produsse forse l'opera per eccellenza che esemplifica il concetto di modularità, almeno a livello formale: La Nakagin Capsule Tower sperimentò una nuova visione della prefabbricazione con la quale promuoveva non più i singoli componenti come elemento minimo costruttivo, ma intere capsule autoportanti, le quali erano successivamente collegate ad un nucleo strutturale di servizio principale (Oshima and Waern 2008).

Un ulteriore approccio progettuale fu proposto dal progettista Moshe Safdie durante l'EXPO a Montreal nel 1967: l'architetto israeliano naturalizzato canadese, al contrario delle precedenti soluzioni descritte, basò il sistema strutturale del suo Habitat '67 su unità semplici modulari, le quali potevano essere interconnesse tra loro formando una struttura autoportante. Il grado di innovazione risiedeva nel fatto che tali unità – costituite da pannelli prefabbricati in calcestruzzo – erano facilmente personalizzabili e permettevano dunque una spiccata flessibilità nell'assemblaggio dei vari moduli tra loro. Questa possibilità di poter combinare in varie disposizioni le celle - senza necessitare di megastrutture portanti come nel caso metabolista - ha dimostrato a livello compositivo una grande varietà figurativa dal punto di vista morfologico e delle facciate, differenziandosi totalmente rispetto alle coeve soluzioni proposte, come per esempio i sistemi costruttivi "plattenbau" – e i corrispettivi chruščëvka sovietici

- che negli stessi anni stavano spopolando in tutta Europa, ma anche nei riguardi dei metabolisti giapponesi con il loro concetto di "pod" (Rossi, 2023).

Il risultato compositivo raggiunto da Safdie fu, involontariamente, tra i primi a dimostrare una tipologia di aggregazione che cinquant'anni dopo divenne caratteristica essenziale del movimento discreto: pur non utilizzando le tecniche aggregative e potenzialità computazionali della generazione del Second Digital Turn, l'Habitat '67 esprimeva con forza un concetto che dall'età classica sino al modernismo era sempre stato allontanato con forza: l'incompletezza. Habitat '67 profetizzò come un sistema aperto potesse essere simbolo di un'architettura procedurale che non è mai finita, che può sempre essere continuata con nuove unità e aggregazioni senza necessariamente andare a ricercare una completezza d'insieme, in quanto l'espressione e la forza di tale sistema risiedeva nella sua vitalità di continua crescita organica, imprevedibile e non controllata.

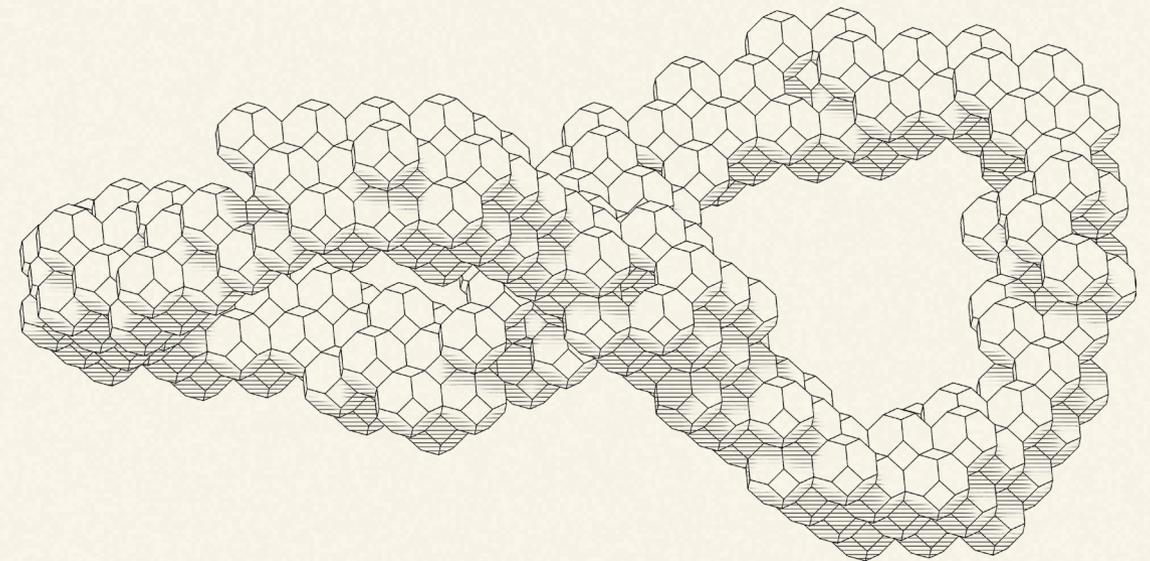


Moshe Safdie - Habitat '67, EXPO 1967, Montréal, 1967.  
(fonte: Garner 1996, p. 133).

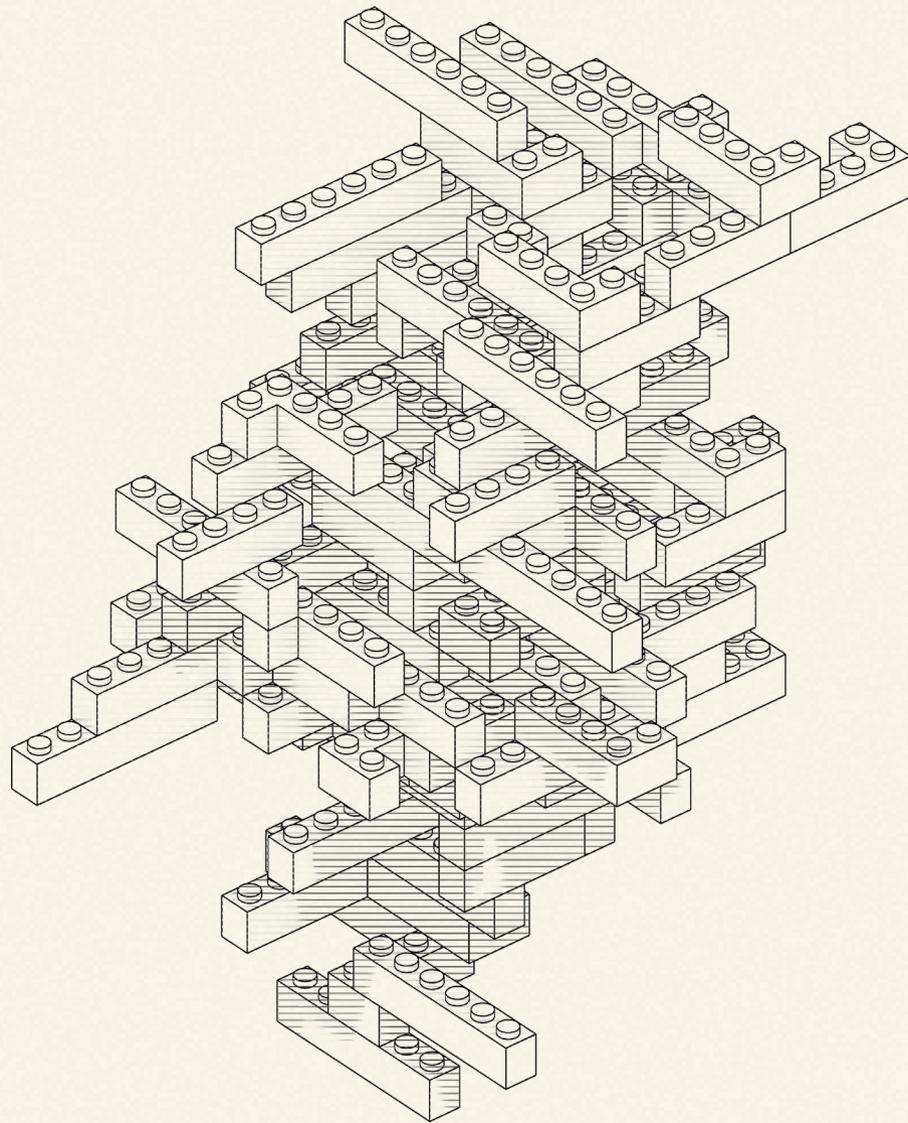
## 4.2 Digital Material

L'espressione compositiva dell'Habitat '67 è – come discusso nel precedente paragrafo – pura aggregazione: l'apparente incompletezza dell'agglomerato residenziale rappresenta architettonicamente una sorta di spontaneità generativa, in cui la somma delle singole parti non è predeterminata e per tale motivo non esiste una composizione corretta con cui svolgere tale operazione. Ciò è stato possibile in quanto ogni singola sub-unità contiene le informazioni minime necessarie alla propria autosufficienza – in questo caso, 15 differenti unità abitative autonome – e per tale motivo ogni unità potrà aggregarsi con qualsiasi altra unità, in quanto non dipendente da una gerarchia di un insieme predeterminato. L'Habitat '67 potrebbe essere descritto, in termini

informativi, come un sistema a base 15: il suo alfabeto è composto da 15 lettere, o simboli, e tali lettere permettono di scrivere innumerevoli testi (in questo caso, agglomerati architettonici). Come ampiamente discusso nel capitolo 2, la stampa a caratteri mobili di Gutenberg sarebbe stata di diversi ordini di grandezza più efficiente se l'alfabeto latino su cui si basava fosse stato a base 2 e non a base 26: la discretizzazione delle informazioni in unità semplici è stata infatti la base del successo dei computer, i quali potendo puntare sulla forza bruta elettronica non avevano la preoccupazione della quantità dei dati da trascrivere, seppur estremamente inefficiente per un cervello umano. Per poter scrivere la parola “parola” il sistema a base 26 dell'alfabeto neces-



*Digital Material basato su plugin WASP, codice generativo condiviso da Andrea Rossi. (fonte: rielaborazione dell'autore).*



*Digital Material basato su plugin WASP, codice generativo condiviso da Andrea Rossi. (fonte: rielaborazione dell'autore).*

sita la trascrizione di 6 volte un bit di informazione - ossia le sei lettere che compongono la parola "parola" - e dunque con 1/26 di possibilità di successo di scrivere ogni lettera. Nel sistema binario informatico, basato esclusivamente sui numeri 0 e 1, o "vero/falso" o "A/B", ogni trascrizione di informazione avrà un successo del 50%. Il concetto di "bit" per la trasmissione delle informazioni non è comunque di certo un'invenzione dell'essere umano: l'esempio più lampante - e più di successo - di un ottimo sistema di trascrizione delle informazioni seguito da una buona minimizzazione dei potenziali errori è infatti dato dalla vita sulla Terra basata sul codice genetico. Le molecole di DNA e RNA sono composte da un codice quaternario di 4 basi uniche - dunque più complesso rispetto ai codici binari informatici a base due - che, potendosi combinare in catene, sono in grado di produrre tutti gli esseri viventi sulla terra, dalla pianta di avocado sino alla balenottera azzurra. Grazie alla discretizzazione delle informazioni su base quattro, i tassi di errore legati al "copia-incolla" delle informazioni sono relativamente bassi, ed infatti le mutazioni genetiche sono l'eccezione e non la regola. La discretizzazione può essere tradotta inoltre non solo in termini informativi, ma anche spaziali: il già citato sistema di blocchi da costruzioni Anker-Steinkasten

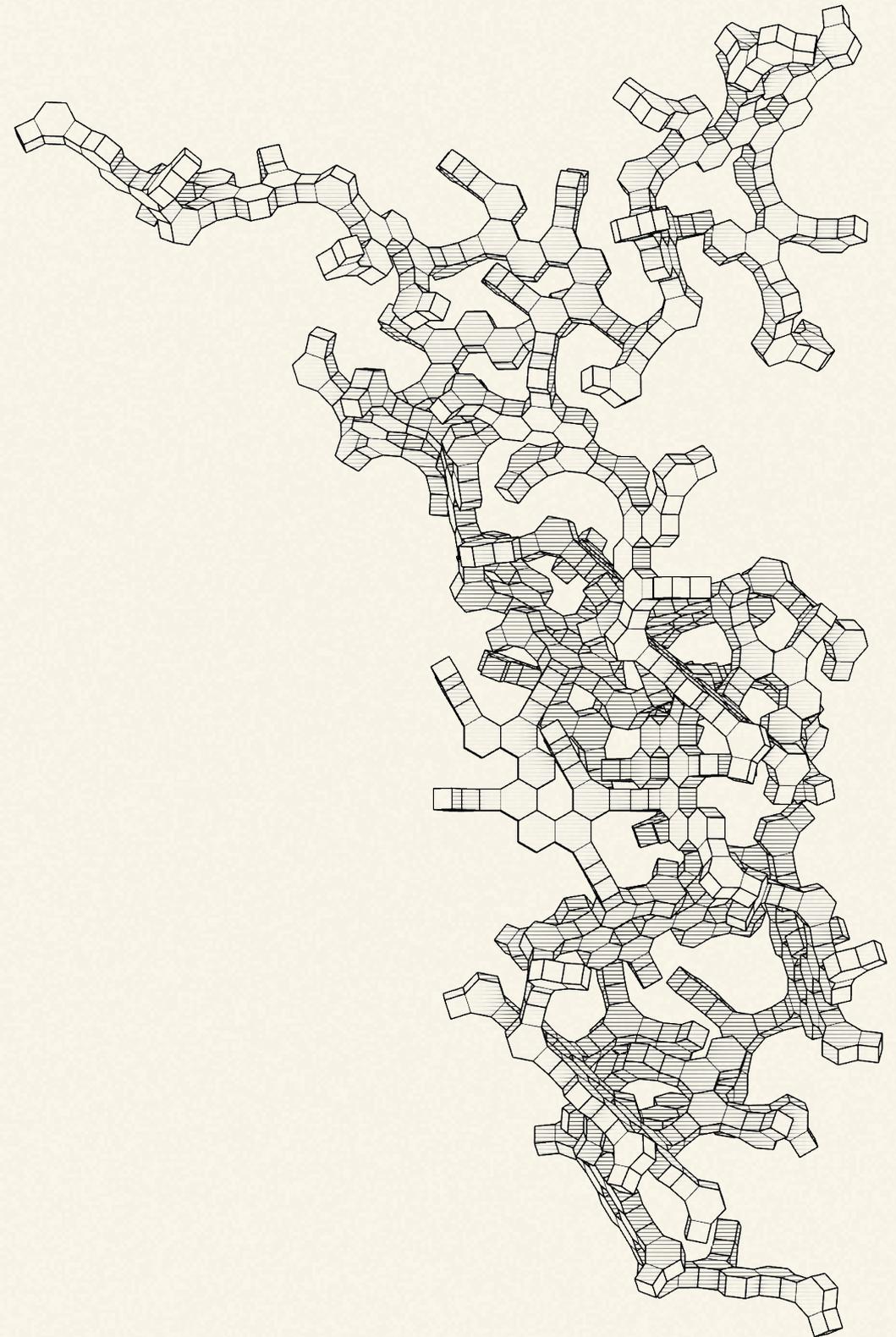
ne è stato un esempio a scala di giocattolo, ed anzi sarebbe ancora più corretto citare il suo diretto discendente, ossia il sistema LEGO. Con la produzione di blocchi giocattolo senza una "funzione" prevista - al contrario del kit prodotto dai fratelli Lilienthal che mimava spesso porzioni di componenti architettoniche - il famoso sistema di blocchetti ideato in Danimarca dà la possibilità ad infanti di pochi anni, i quali possiedono una precisione di posizionamento di circa 0,2 millimetri, di poter assemblare correttamente le parti con una precisione sub-millimetrica di circa 5 micron (Ward, 2010): questo per merito del fatto che il reticolo 3D si auto allinea ad ogni incastro permettendo il posizionamento con elevato grado di precisione. Questi differenti metodi per la discretizzazione spaziale e informativa sono diventati la base teorica per l'ideazione dei digital materials, la cui definizione è stata coniata dal ricercatore Jonathan Ward nella sua tesi magistrale presso il centro di ricerca CBA (Center for Bits and Atoms) del MIT:

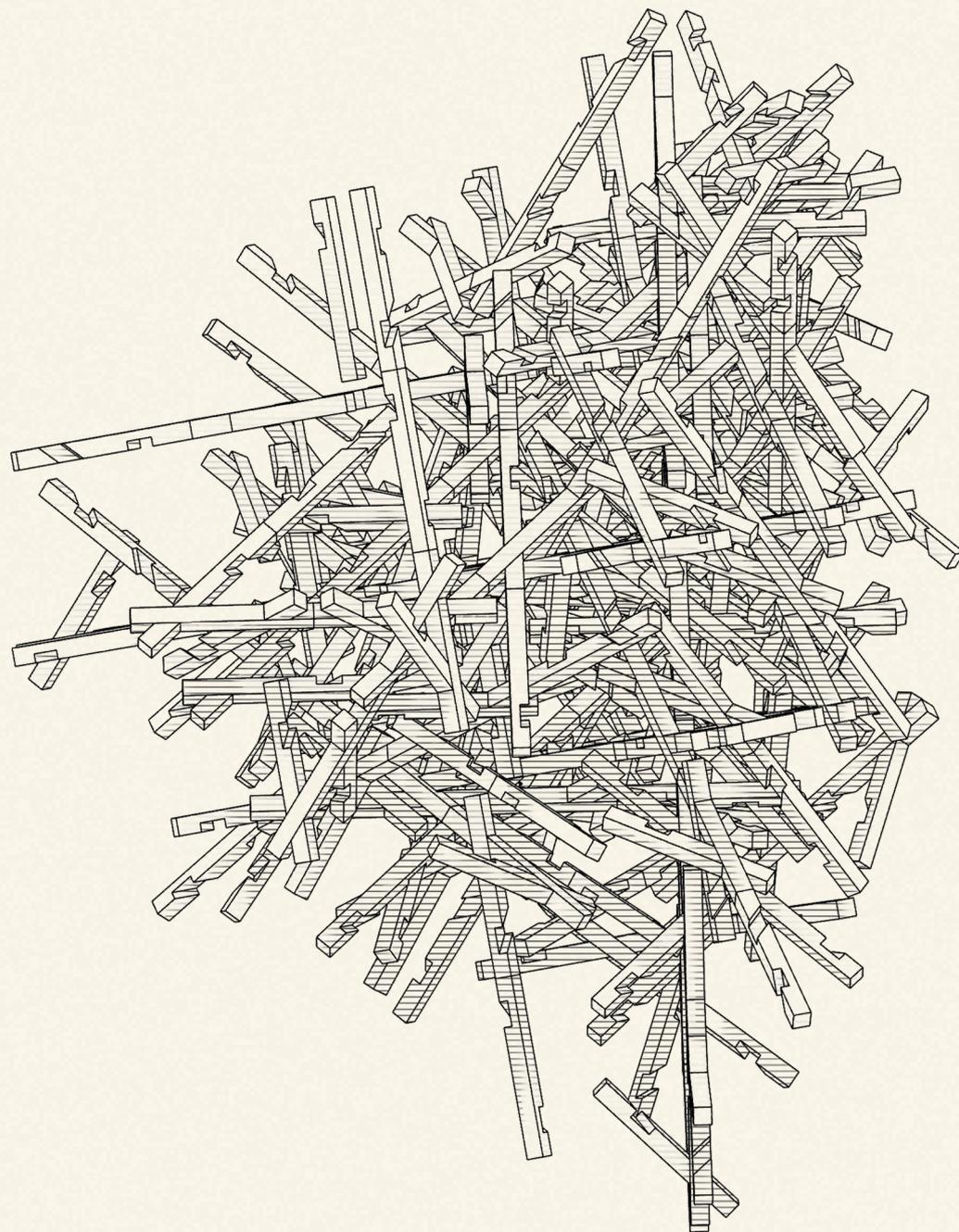
*“A digital material is made up of a discrete number of parts which have a finite number of connections [...] A digital material consists of a finite number of building blocks which have discrete joints and occupy discrete space.”*  
(Ward 2010, p.11)

*“Un materiale digitale è costituito da un numero discreto di parti che hanno un numero finito di connessioni [...] Un materiale digitale è costituito da un numero finito di elementi costitutivi che hanno giunti discreti e occupano uno spazio discreto”*

Una interessante comparazione proposta dallo stesso Ward sottolinea le differenze tra il sistema discreto per eccellenza, il blocco LEGO, con il sistema architettonico millenario che di primo acchito verrebbe da definire anch'esso discreto, ossia il mattone. A differenza, infatti, delle giunzioni maschio-femmina del blocco LEGO che possono svolgere o meno un'altra connessione con un altro blocco, la giunzione della muratura è svolta da un materiale continuo, ossia la malta cementizia. Il mattone e il suo sistema costruttivo possono essere definiti dunque discontinui, o analogici, in quanto lo stato fluido della malta permette di poter posizionare il mattone in infinite posizioni, andando dunque a perdere la caratteristica di elemento riempitivo di uno spazio discreto (Ward 2010). Il termine digitale infatti deriva dal termine anglosassone “digit”, il quale si riferisce a tutto ciò rappresentabile basandosi su numeri discreti; il suo opposto è invece il

*Digital Material  
basato su plugin  
WASP, codice  
generativo condiviso  
da Andrea Rossi.  
(fonte: rielaborazione  
dell'autore)*





*Digital Material  
basato su plugin  
WASP, codice  
generativo condiviso  
da Andrea Rossi.  
(fonte: rielaborazione  
dell'autore)*

Il direttore del centro di ricerca CBA Neil Gershenfeld definì in maniera più sistematica e approfondita il termine Digital Material secondo quattro caratteristiche, sempre prendendo come esempio il sistema costruttivo LEGO:

1. **Affidabilità:** a causa della correzione degli errori che deriva dallo scatto durante la connessione dei blocchi, il sistema LEGO è più accurato della precisione motoria di un bambino.
2. **Modularità:** i mattoncini LEGO realizzati con materiali differenti possono essere uniti secondo un'interfaccia standard
3. **Località:** un bambino non necessita di righelli per il posizionamento dei mattoncini, in quanto la geometria locale viene descritta dalle parti locali.
4. **Reversibilità:** i mattoncini LEGO, al contrario dei mattoni, possono essere smontati e riutilizzati, in quanto contengono informazioni che guidano lo smontaggio.

Questi quattro attributi – affidabilità, modularità, località e reversibilità – sono i principi essenziali dei sistemi digitali per la comunicazione, il calcolo e la fabbricazione (Gershenfeld 2017). Inoltre, questi quattro attributi sottendono una nuova caratteristica che

non era stata ipotizzata sino a quel momento: la mancanza della funzionalità. Al contrario della quasi totalità dei sistemi modulari progettati e prodotti durante il XX secolo - i quali legavano ad ogni elemento una specifica funzione da svolgere - il materiale digitale non possiede alcuno “spirito di esistenza”: la sua funzionalità viene descritta esclusivamente dal rapporto con gli elementi connessi al suo attorno e dalla tipologia di connessione.

## 4.3 L'architettura discreta

Sino agli inizi del nuovo millennio “[...] la modularità era stata definita come composizione di parti funzionalmente differenziate, in cui ogni tipo aveva una funzione unica all’interno dell’insieme e non poteva essere riutilizzato per altri usi.” (Rossi 2023, p. 40). Questa definizione comprendeva sia le colonne e travi ellenistiche, che le capsule metaboliche nipponiche, con eccezione dello straordinario lavoro di Gropius svolto negli Stati Uniti di cui si è ampiamente discusso e di pochi altri professionisti, come Richard Buckminster Fuller e le sue strutture reticolari in acciaio. Questa idea condivisa riguardante la differenziazione funzionale come principio essenziale per la definizione dei singoli elementi portò paradossalmente a risultati

opposti rispetto a quelli aspirati: se è pur vero che l’obiettivo finale della modularità risiedeva nel fatto di poter dare la possibilità di flessibilità e personalizzazione, i sistemi modulari ideati erano comunque sempre basati su complesse gerarchie funzionali che di fatto distribuivano in maniera disuniforme il controllo sulla forma costruita, di fatto dunque andando ad inficiare sulla possibilità di cambiamento e predeterminando fortemente i risultati finali ottenibili con il sistema; la gerarchia di controllo alla base di questi sistemi modulari dunque non differiva troppo rispetto alle loro controparti che costituivano invece sistemi non modulari, andando dunque a dissipare il forte potenziale che la modularità poteva offrire in termini di libertà progettuale (Rossi 2023).

Come accennato a inizio capitolo, agli inizi degli anni '10 del ventunesimo secolo una nuova generazione di architetti e designer iniziò a mettere in discussione la maniera con la quale la modularità era stata intesa e applicata sino a quel momento, rimuovendo completamente il concetto di funzione come caratteristica essenziale per la descrizione dell’elemento e ponendo invece attenzione verso delle componenti generiche che descrivessero la loro potenzialità in base alla loro relazione con le altre componenti del sistema. Al contrario dell’approccio parametrico “continuo”, all’interno del quale la geometria dell’insieme detta la morfologia e geometria dei singoli sub-componenti, come nel caso della Centro Culturale Heydar Aliyev di ZHA - di fatto relegandoli ad un’unica specifica posizione nello spazio - il sistema parametrico “discreto” propone una gerarchia bottom-top con la quale è la somma tra le singole parti - ossia i digital materials - a dettare la composizione globale.

Pur essendo relativamente recente il concetto di discreto applicato all’architettura, questa nuova posizione digitale della modularità ha riscosso un notevole successo - e differenti critiche - nell’ambito accademico. Il portavoce più celebre di tale “movimento”, il quale ha continuato e

portato in risalto il lavoro iniziato nel 2010 da Jonathan Ward è senza dubbio Gilles Retsin, professore presso La Barlett School of Architecture della UCL. Il docente ed architetto belga, fondatore dell’UCL Design Computation Lab, si è inserito nel dibattito architettonico in completa opposizione al modello parametricista di Patrik Schumacher, criticando alla radice l’architettura “continua” in quanto nei precedenti due decenni la Digital Turn in Architecture - caratterizzati dalla potenziale svolta del digital fabrication e computational design - non è stata in grado di rivoluzionare realmente il mercato architettonico. Se da un lato l’architettura hadidiana ha dimostrato di poter produrre intere opere d’arte grazie all’utilizzo straordinario dei nuovi metodi progettuali e produttivi disponibili, Retsin sottolinea anche il fatto che questa svolta tecnico-produttiva è rimasta relegata ad una ristrettissima porzione di edifici:

*“Digital fabrication entered the discourse under the framing of a neo-medieval “digital craft”: the art of making beautiful and unique things, lost in industrial mass-production, but newly made accessible by digital machines.” (Retsin 2019, p. 10)*

*“La fabbricazione digitale è entrata nel discorso sotto l'inquadratura di un “artigianato digitale” neo medievale: l'arte di creare cose belle e uniche, perse nella produzione industriale di massa, ma rese nuovamente accessibili dalle macchine digitali”*

L'architettura discreta cerca di traguardare l'ambizioso obiettivo di utilizzare le nuove tecnologie digitali per ridefinire l'intera catena di produzione dell'architettura nell'immediato futuro: tale impegno interessa dunque non la mera superficie esteriore dell'oggetto architettonico, ma si focalizza sulle “ossa” e le particelle elementari dell'edificio. Secondo la visione discreta, dunque, vi è l'interesse di riconsiderare ciò che era stato promulgato a partire dal movimento post-moderno e successivamente applicato a partire dagli anni '90 era stato rifiutato: la serialità e la logicale matriciale dell'industrializzazione che aveva segnato tutta l'architettura del movimento moderno e più in generale del XX secolo. Secondo Retsin, infatti, gli ultimi due decenni di ricerca sulla fabbricazione digitale non si sono mai preoccupati seriamente della scalabilità dei sistemi, critica mossa anche da Kas Oosterhuis:

*“We should not build pavilions, we should build skyscrapers! If we don't develop technology that is fit for a skyscraper, then it will always be a random fringe. You have to relate to practice [...] the industry should not solve our problem, we have to solve it our selves.”*

*(Oosterhuis in Carpo, 2017a)*

*“Non dovremmo costruire padiglioni, ma grattacieli! Se non sviluppiamo una tecnologia adatta a un grattacielo, allora rimarrà sempre una nicchia casuale. Bisogna rapportarsi alla pratica [...] l'industria non deve risolvere il nostro problema, dobbiamo risolverlo da soli.”*

Il movimento parametricista, infatti, rifiutando nettamente il principio della scalabilità di massa di elementi standardizzati, è riuscito a dimostrare grazie alla logica dei parametri che ogni progetto può essere personalizzato sulla base del principio file-to-factory: il sistema matrice industriale del XIX e XX secolo è di fatto non più economicamente vantaggioso, in quanto la produzione personalizzata dei singoli elementi costruttivi non dimostra un costo aggiuntivo. La critica del movimento discreto risiede nel fatto che tale modello non ha comportato una reale personalizzazione di massa nell'architettura generale, ma ha interessato quasi esclusivamente opere architettoniche che sono viste come l'eccezione nel loro intorno e non la regola: la restante totalità del mondo delle costruzioni continua a seguire le logiche di standardizzazione ed economia di scala figlie dell'industrializzazione, raramente interrotte da un'opera di Gehry o Bjarke Ingels. Di fatto il parametricismo continua attrarre l'attenzione non tanto per le sue qualità esterne compositive – le quali oramai iniziano a presentare dei pattern ripetuti ben riconoscibili, tutt'altro che innovativi – ma per il fatto che la sua presenza circondata dalla standardizzazione totale lo fa percepire come una novità rivoluzionaria. Eppure tale movimento architettonico esiste da più di trent'anni,

come i sistemi produttivi su cui si basa: il movimento moderno degli anni '20 non ha tardato a interessarsi alle differenti scale dell'architettura, che vanno dai ricchi clienti per ville monofamiliari come Ville Savoye, al social-housing del Karl Marx Off sino ai grattacieli americani come il Rockfeller Center; il parametricismo sembra invece dare quasi totale prerogativa a manufatti di grandi dimensioni quali grattacieli, centri funzionali e culturali o zone infrastrutturali, non interessandosi della rimanente quota parte di architettura generalista – che però rappresenta la quasi totalità dei parchi edilizi.

Il movimento discreto, al contrario, tenta di sovvertire questa tendenza andando a riconsiderare la ripetizione seriale come “ [...] un'economia di scala in grado di fornire fabbricazione, personalizzazione e adattabilità con principi scalabili.” (Retsin 2019, p. 25). Vi è da sottolineare il fatto che il discreto non ha l'intenzione di ritornare alla produzione di massa seriale di unità identiche – di fatto riproponendo quanto già fatto per 50 anni dal movimento moderno – ma di unire due mondi descritti sempre come opposti: la standardizzazione dell'industrializzazione e la personalizzazione del parametricismo. L'idea di fondo è di sfruttare i vantaggi oggettivi della produzione seriale standardizzata su grande scala – ancora tutt'oggi attuali checché se ne dica del-

la preannunciata ma mai di fatto diffusa rivoluzione digitale – con i principi della personalizzazione del parametricismo, i quali si fondano esclusivamente sulle potenzialità del computational design: seguendo tale logica sarebbe possibile sviluppare un nuovo tipo di progettazione che possa essere personalizzabile non dal punto di vista del singolo elemento – dunque ogni pannello del rivestimento differente l'uno dall'altro, come nel caso dello SkilledIn Office di Studio RAP – ma piuttosto facendo affidamento ad una logica combinatoria in cui i componenti architettonici senza una funzione specifica possono essere connessi e sostituiti in maniera estremamente libera, senza necessità di dover sottostare ad una gerarchia superiore che descrive un risultato finale già preconfezionato. Partendo dal principio che non si basi la progettazione su parti personalizzate – e dunque relegate ad uno specifico posizionamento nello spazio – il modello discreto è di fatto un sistema modulare aperto composto da parti edilizie generiche che – proprio per il fatto che si tratta di un sistema aperto – hanno la possibilità di poter essere inserite a piacimento in una matrice spaziale: questa “granulosità” spaziale potrà sembrare estremamente avulsa e poco pratica, ma è il medesimo principio di cui si discuteva nel precedente paragrafo rispetto al sistema di costruzioni

LEGO. Non esiste un blocchetto che si chiama “trave” o “pilastro”, ma esistono solamente blocchetti di differenti forme che da soli non presentano alcuna funzione, ma il cui significato sorge solamente in base a quali tipi di connessioni sono state create.

Basandosi sul concetto di digital material – dunque elementi standardizzati ripetuti e connessi tra loro in maniera reversibile – l'architettura discreta permette non solo di proporre un nuovo tipo di composizione architettonica basata sull'incompletezza e generazione spontanea di forme architettoniche – come il parametricismo aveva fatto con una nuova estetica di continuità e fluidità – ma consente soprattutto la possibilità di architettura per il riuso: la trasformabilità, riconfigurazione e aggiunta di porzioni ai manufatti architettonici non è permessa né in un sistema modulare “chiuso” (come quello spopolato negli Stati Uniti a partire dagli anni '50) né tantomeno dal parametricismo, in cui il posizionamento unico nello spazio di un specifico elemento personalizzato è prerogativa essenziale per il risultato finale continuo. La posizione univoca nello spazio non esiste invece nel concetto discreto, ciò significa che l'aggiunta o rimozione di parti per una nuova personalizzazione dell'edificio è possibile in quanto non esiste una gerarchia superio-

re che decreta l'insieme del tutto. Inoltre, non solo è resa concepibile una continua e aggiornata personalizzazione dell'edificio, ma è anche possibile il totale smontaggio per la progettazione di un edificio totalmente nuovo, in quanto

*“The physical building becomes only a temporary formation and can be seen as material stock for future buildings: Its elements can be disassembled and reassembled in different forms according to changing needs over time.”*  
(Rossi 2019, p. 4)

*“L'edificio fisico diventa solo una formazione temporanea e può essere visto come riserva materiale per edifici futuri: i suoi elementi possono essere smontati e rimontati in diverse forme a seconda delle mutevoli esigenze del tempo.”*

Concentrandosi dunque su concetti di progettazione combinatoria - resa possibile dal computational design – assemblaggio semplificato e incastro reversibile, questo approccio digitale punta ad ottenere aggregazioni modulari di componenti – ossia, gli edifici – le offrono la possibilità di fornire un nuovo modello progettuale per esplorare un'idea di architettura meno interessata alla permanenza e più attenta invece all'adattabilità, al riuso e al cambiamento. Al contrario dell'approccio parametrico – all'interno del quale il potenziale del computational design viene utilizzato per la differenziazione e la generazione di elementi unici con un'univoca posizione nello spazio – l'approccio discreto, in-

vece, investe le capacità della progettazione computazionale per il calcolo di aggregazioni di elementi standardizzati in un vasto dominio di soluzioni combinatorie (Rossi, 2019). L'utilizzo di parti ripetute - come i digital materials - permette anche di dimostrare come la standardizzazione industriale e la logica matriciale che ha dettato l'architettura e più in generale la società del XX secolo è un concetto tutt'altro che obsoleto e anacronistico: i vantaggi della standardizzazione – quali affidabilità, qualità e scarti ridotti – possono essere ancora sfruttati dalla fabbricazione digitale, la quale apportando ulteriori vantaggi – come livelli di precisione e soprattutto un ciclo nettamente più rapido tra progettazione e produzione – permette di sviluppare un sistema produttivo basato su personalizzazione, standardizzazione ed efficienza in termini di tempi e costi.

L'architettura discreta ad oggi è ancora ai suoi albori: di fatto con la prima definizione nella storia di cosa sia un digital material – ossia nel 2010 – questo approccio ha cominciato a interessare il mondo dell'architettura da appena un decennio, all'interno del quale il larga parte si è speso moltissimo lavoro in termini di ricerca accademica nel comprendere quali possano essere le potenzialità e le limitazioni di ripensare completamente il concetto di componente architettonico – e dunque l'intero processo ideativo costruttivo di per sé. Come a partire dagli anni '90 alcuni professionisti hanno cominciato ripensare da zero come un'architettura potrebbe essere stata prodotta – ossia non più con la mentalità da catalogo edilizio, ma con in mente la possibilità di produrre su misura ogni singolo elemento – oggi giorno un numero sempre maggiore di ricercatori ed architetti cercano di indagare

come un blocco universale possa produrre un sistema costruttivo efficiente ed al tempo stesso flessibile per le nuove esigenze di una società sempre più coinvolta nei temi della riconfigurabilità, riutilizzo e personalizzazione. Le ricerche nel campo del discretismo svolte negli ultimi dieci anni hanno interessato vasti campi della progettazione, a partire dal design industriale di arredo sino a nuovi processi costruttivi per l'implementazione robotica, oltre che chiaramente la scala architettonica. Nelle pagine seguenti verranno riportati alcuni progetti chiave che hanno segnato sino a questo momento il percorso discreto, dimostrando limiti e potenzialità di questo nuovo pensiero progettuale, in particolare mostrando una nuova chiave compositiva basata sulla modularità aperta e l'incompletezza, in grado di produrre un'architettura fondata non sulla permanenza, bensì sulla transitorietà e temporaneità.



Gilles Retsin - Padiglione, Biennale dell'Architettura di Tallinn, 2017.  
(fonte: Gilles Retsin)



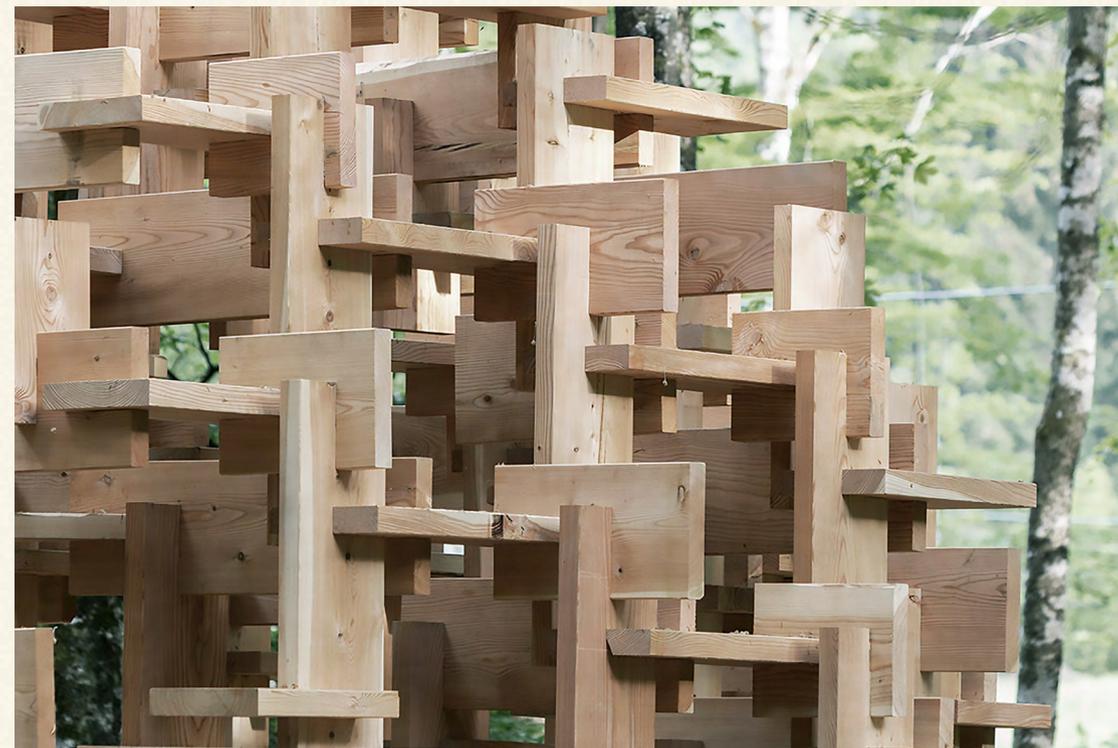
Gilles Retsin - Padiglione, Biennale dell'Architettura di Tallinn, 2017.  
(fonte: Gilles Retsin)



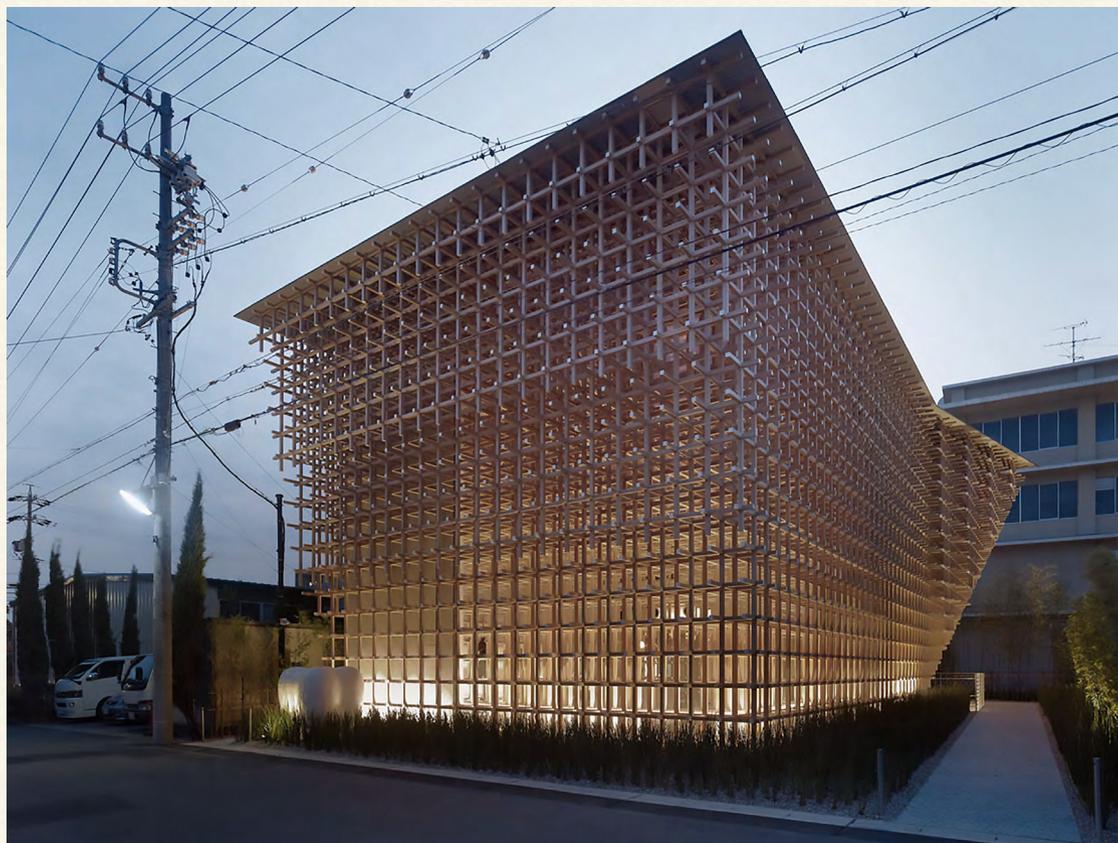
Gilles Retsin - Padiglione, Biennale dell'Architettura di Tallinn, 2017.  
(fonte: Gilles Retsin)



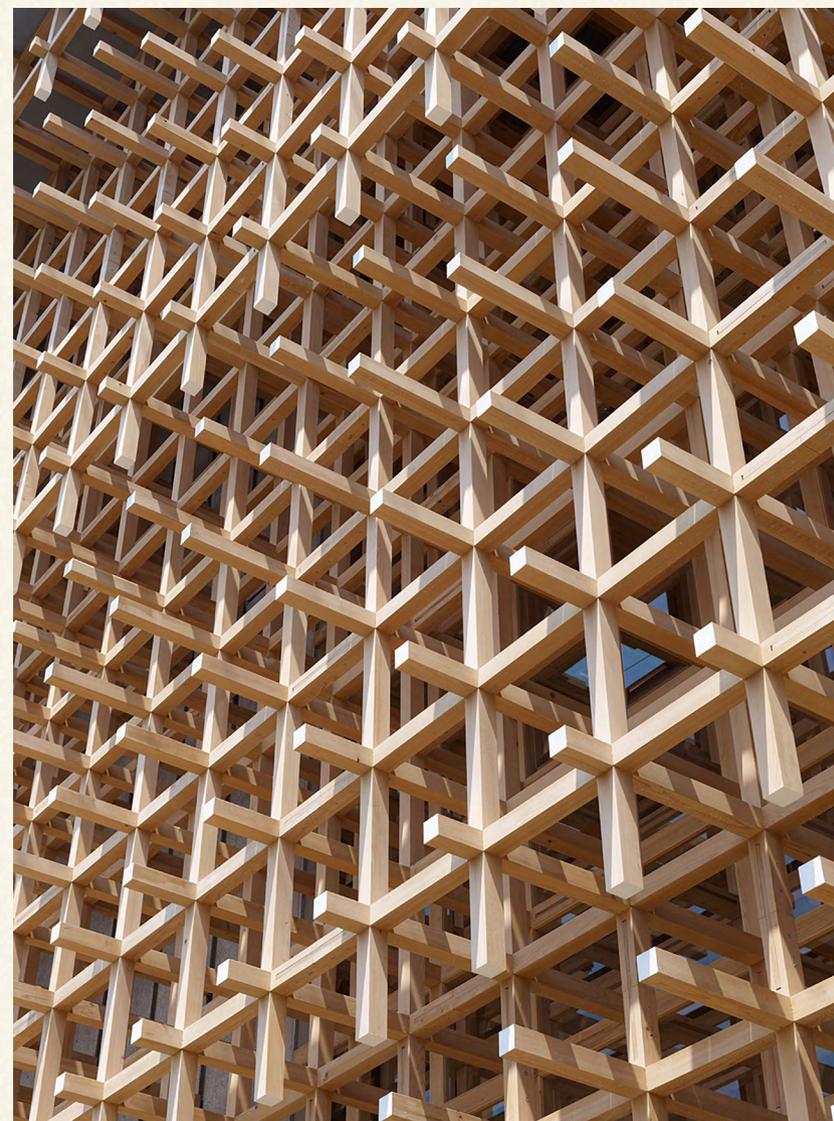
*Kengo Kuma and Associates - Padiglione Kodama, Trento, 2018.  
(fonte: Kengo Kuma Associates)*



*Kengo Kuma and Associates - Padiglione Kodama, Trento, 2018.  
(fonte: Kengo Kuma Associates)*



*Kengo Kuma and Associates - Centro di ricerca del Museo GC Prostho, Aichi, 2010.  
(fonte: Kengo Kuma Associates)*

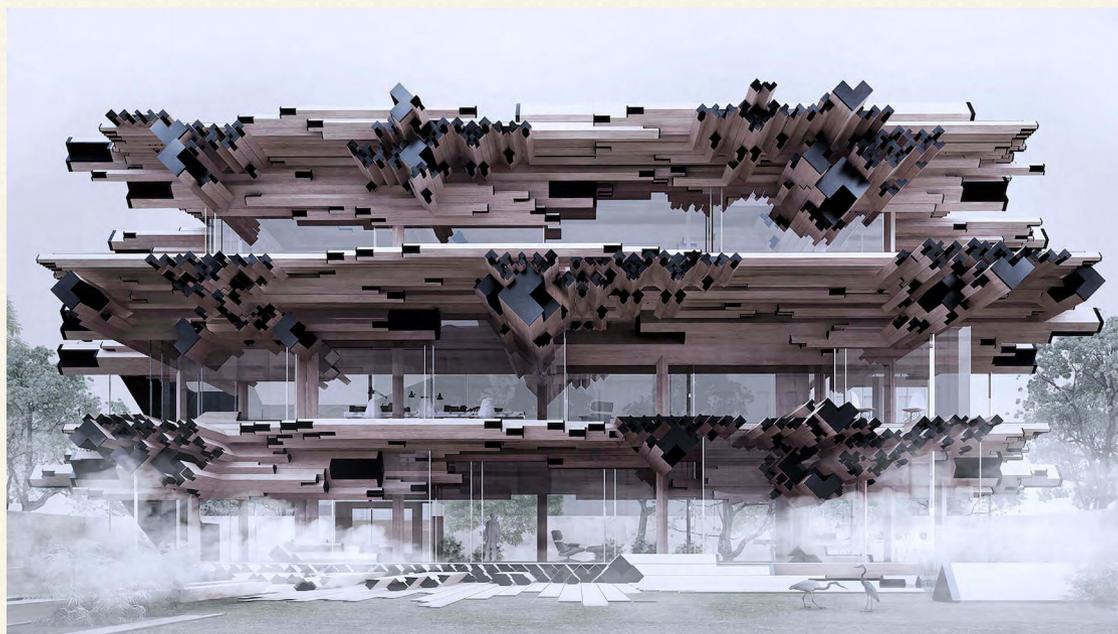


*Kengo Kuma and Associates - Centro di ricerca del Museo GC Prostho, Aichi, 2010.  
(fonte: Kengo Kuma Associates)*



Gilles Retsin - Sala Concerti, Norimberga, 2018.  
(fonte: Gilles Retsin)

Gilles Retsin - Sala Concerti, Norimberga, 2018.  
(fonte: Gilles Retsin)



Gilles Retsin - *Diamanti, casa plurifamiliare*, 2016.  
(fonte: Gilles Retsin)



Gilles Retsin - *Blokhut, Studio per una commissione privata*, 2015.  
(fonte: Gilles Retsin)

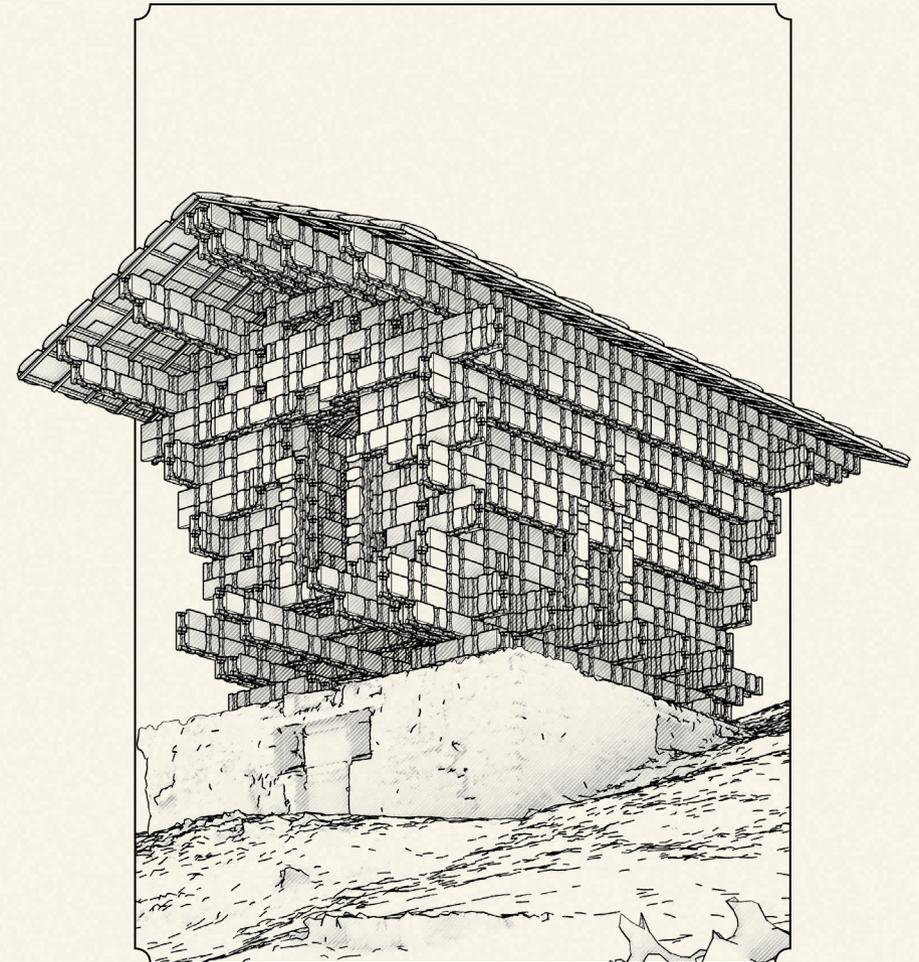
*“[The Discrete] is not afraid of seriality, long straight lines, bulky elements, unfinished forms, raw materials – or even boxes, the old enemy of both Post-modernism and the digital.”*

*“[Il Discreto] non ha paura della serialità, delle lunghe linee rette, degli elementi ingombranti, delle forme non definite, delle materie prime – e nemmeno delle scatole, vecchio nemico sia del postmodernismo che del parametricismo”*

**Retsin 2019, p. 9**

- Capitolo V -

ARCHITETTURA  
DISCRETA BLOCKBAU



## 5.1 Il blockbau è discreto

I precedenti capitoli da I a IV potrebbero sembrare di primo acchito una superflua disamina storica dell'evoluzione dei metodi costruttivi, partendo dalla maniera artigianale, passando per l'industrializzazione sino ad arrivare ai giorni nostri con i moderni metodi produttivi basati sulla digitalizzazione e personalizzazione. Di fatto, ci si chiederebbe perché è stato necessario trattare i metodi costruttivi del XVII secolo per poi discutere solamente nell'ultimo sottocapitolo cosa sia l'architettura discreta: si sarebbe potuto tranquillamente analizzare nel primo capitolo quale sia il concetto discreto ed andando ben più nello specifico delle sue potenzialità dal punto di vista di digital fabrication, affrontando per esempio l'enorme tema della robotizza-

zione del cantiere estremamente più semplificata oppure le innovative potenzialità offerte da questo metodo progettuale lato software da un punto di vista della gestione strutturale e di efficientamento della forma. A onor del vero sarà possibile che tutt'ora non si abbia una idea totalmente chiara di cosa sia l'architettura discreta o, peggio ancora, che sia abbia la sensazione che sia un'idea totalmente involuta e esageratamente complicata, distante dall'effettiva pratica architettonica e relegata esclusivamente a stimolanti ma potenzialmente inconcludenti sproloqui e speculazioni accademiche. Ed è giusto che sia questa la sensazione: la pratica discreta è appena agli albori e vive ancora nel suo stato di provocazione, azzardo e ribellione. Come per i modernisti l'ornamento era

il delitto, per i "discretisti" la linea continua non è altro che un capriccio compositivo totalmente superfluo nella concezione di fruibilità, riadattabilità e riutilizzo; ogni nuova generazione di progettisti ha fame di voler ripensare totalmente i paradigmi della precedente generazione, e così è tale anche per i nuovi architetti "discretisti".

Ma andando con ordine: perché il blockbau è discreto? Scriverò brevemente come è nata questa suggestione, ma sembrerà tanto romanzata da apparire interamente inventata per necessità di narrazione, dunque non mi aspetterò che nessuno ci credi. A settembre 2022 si stava svolgendo il workshop Atelier 2000 presso la Valpelline: scopo del progetto riguardava la progettazione e costruzione di un bivacco elitrasportabile per il monitoraggio dei ghiacciai. Lungo il percorso della diga di Place Moulin – per raggiungere il rifugio Prarayer – è presente un rascard, ossia un'architettura rurale lignea utilizzata per lo stoccaggio di cereali ed altri viveri nelle epoche passate; tali architetture sono tipiche delle valli valdostane con influenza vallese, e sono presenti in varia forma in differenti parti d'Europa. Innanzitutto, da un punto di vista progettuale è estremamente stimolante scoprire come tecniche costruttive basate esclusivamente su incastri lignei riescano a produrre solette, sbalzi,

coperture sporgenti e più in generale un'architettura tradizionale che non solo sembra voler sfidare il pendio della montagna, ma le stesse leggi statiche della fisica. In secondo luogo, la sensazionalità di questo specifico rascard risiede nel fatto che la sua ubicazione odierna non sia quella storica. Nel 1966, infatti, l'edificio blockbau in legno venne smontato e rimontato ad una quota altimetrica superiore in vista dell'allagamento dell'invaso per la nuova diga appena completata; se questo non sembra eccezionale, basti pensare che tale edificio venne costruito negli anni '30 del XV secolo (Remacle 2014, p. 385). Ciò significa che un manufatto architettonico di più di cinquecento anni fa era di fatto smontabile e ricostruibile senza particolari difficoltà da degli operatori più di mezzo millennio dopo, grazie esclusivamente alla tipologia di connessione a secco e alla "discretizzazione" degli elementi costruttivi. Ogni singolo elemento era stato riutilizzato non solamente per merito dell'ottimo stato di conservazione, ma perché di fatto ogni componente conteneva già intrinsecamente le informazioni geometriche per la sua decostruzione senza che quest'ultima fosse invasiva e dunque distruttiva nei riguardi dei singoli elementi. Potrà sembrare un avvenimento non così sensazionale, o per giunta banale, eppure oggi quante delle case che



*Rascard Lo Noaillo - proprietà della famiglia Cheillon, prima che fosse smontato, 1966.  
(fonte: Pulz 2011, p. 79)*

noi abitiamo sarebbero in grado di essere decostruite, trasportate e rimontate efficacemente in un'altra ubicazione? Per giunta, nel futuro 2.500 d.C.? A questo primo stimolo se ne aggiunse un secondo, mosso dal mio personale interesse nei riguardi della progettazione parametrica e soprattutto dal fatto che fossi nel periodo in cui stessi ricercando il mio tema di tesi, e durante il quale i precedenti 24 temi vagliati si erano dimostrati tutti fallimentari: e se esistesse un legame tra architettura blockbau alpina – in particolare nei riguardi degli incastri lignei – e la progettazione parametrica? Si potrebbe tradurre in chiave algoritmica, contemporanea e computazionale le conoscenze tecnico-costruttive degli incastri lignei tradizionali dell'architettura blockbau? A questa domanda non ci fu risposta fino ai successivi sei mesi: a marzo 2023 iniziai a svolgere il mio tirocinio all'estero all'Innovation Dock di Rotterdam presso Studio RAP – studio di architettura incentrato esclusivamente sulla progettazione parametrica – e in questo ambiente estremamente innovativo e stimolante mi imbattei quasi casualmente in una pubblicazione di Andrea Rossi, la quale mi fece scoprire il mondo dell'architettura discreta e dunque il tanto atteso tassello mancante tra il blockbau e il parametrico, almeno nella mia testa.

Ma tornando alla domanda iniziale: perché il blockbau è discreto? Per rispondere a tale domanda, dato che non vi è una definizione univoca di “architettura discreta”, si può partire dalla definizione di digital material analizzata nel capitolo IV. La prima definizione generale di Ward è rispettata, tenendo conto che il digital material in questo caso si intenderebbe il tronco intagliato e dotato di scanature per gli incastri

*“A digital material is made up of a discrete number of parts which have a finite number of connections [...] A digital material consists of a finite number of building blocks which have discrete joints and occupy discrete space.”*  
(Ward 2010, p.11)

*“Un materiale digitale è costituito da un numero discreto di parti che hanno un numero finito di connessioni [...] Un materiale digitale è costituito da un numero finito di elementi costitutivi che hanno giunti discreti e occupano uno spazio discreto”*

Non essendo il tronco di legno collegato con i suoi colleghi con malta o altri leganti “continui”, l’affermazione che il tronco di legno occupa “uno spazio discreto” (ossia matriciale) è confermata, come anche è confermato il fatto che il tronco di legno è costituito da

“giunti discreti” (quindi un numero finito di connessioni), in quanto l’addossare due tronchi dove non è presente l’alloggiamento dell’incastro ligneo non comporterebbe la sua stabilità strutturale. Anche i principi più dettagliati proposti da Gershenfeld - già citati anch’essi nel Capitolo IV per la definizione di un digital material - sono rispettati nell’architettura blockbau:

1. **Affidabilità:** a causa della correzione degli errori che deriva dallo scatto durante la connessione dei blocchi, il sistema LEGO è più accurato della precisione motoria di un bambino.
2. **Modularità:** i mattoncini LEGO realizzati con materiali differenti possono essere uniti secondo un’interfaccia standard
3. **Località:** un bambino non necessita di righelli per il posizionamento dei mattoncini, in quanto la geometria locale viene descritta dalle parti locali.
4. **Reversibilità:** i mattoncini LEGO, al contrario dei mattoni, possono essere smontati e riutilizzati, in quanto contengono informazioni che guidano lo smontaggio.

Constatando dunque i molteplici caratteri in comune tra i fondamenti del discreto e l’architettura blockbau, vi è da domandarsi quali invece siano le limitazioni di questo parallelismo. Innanzitutto, vi è da considerare il fatto che il concetto di blockbau, seppur rispettando teoricamente la descrizione di digital material, non è in realtà un sistema discreto da un punto di vista della modularità aperta: come già detto in precedenza, non esiste una definizione univoca di architettura discreta, ma tutte le ricerche svolte in merito in questi ultimi dieci anni hanno sempre sotteso il principio cardine della modularità aperta, descritta ampiamente nel capitolo IV. Nel caso del blockbau (immaginando di far riferimento ad un tradizionale rascard di dimensione 5x5 metri, simile a quello presente presso la Diga di Place Moulin) questo tipo di modularità viene sostanzialmente a mancare, in quanto ogni incastro è utilizzato e non esistono connessioni ridondanti lasciate libere, questo perché chiaramente nel passato non vi era l’intenzione della decostruzione e futura riprogettazione della struttura, oltre al fatto che l’intaglio di un singolo nodo ligneo aggiuntivo – per giunta inutilizzato - in termini di tempo e maestranza era tutt’altro che un investimento ragionevole. Questa “saturazione” dell’utilizzo di tutti i giunti lignei non decreta di per sé un sistema

modulare chiuso: nello smontaggio si potrebbe infatti, in linea teorica, produrre un’architettura differente rispetto a quella iniziale, ma le limitazioni nel potenziale combinatorio sarebbero tali che il sistema modulare aperto di tronchi blockbau non svilupperebbe i reali potenziali aggregativi di un sistema discreto ideato e progettato per essere modulare ed aperto. In secondo luogo, nell’architettura blockbau i giunti lignei sono cuciti su misura per una specifica funzione: eccetto particolari casi, non esistono giunti “universali” tuttodfare che vengono utilizzati sia per la soluzione angolare delle pareti, che per la connessione pilastro-trave o il nodo trave-trave. L’evoluzione della carpenteria lignea ha portato a produrre moltissimi sistemi di giunzione legno-legno che svolgevano uno specifico compito in base a specifiche sollecitazioni: un chiaro esempio sono gli incastri parete del sottocapitolo 1.1, per il quale gli intagli longitudinali lungo l’asse principale dei tronchi servivano per il bloccaggio dei tronchi lungo l’asse X – dunque non permettendo al tronco di uscire dal perimetro dello spessore di parete – ma al tempo stesso tali incastri non permettevano il bloccaggio lungo l’asse Y, in quanto il tronco poteva “slittare” lungo il tronco sottostante. Gli incastri lignei analizzati invece nel sottocapitolo 1.2 permettevano il bloccaggio nelle dire-

zioni sia X che Y, ed infatti sono stati sviluppati principalmente per la risoluzione dei nodi angolari delle pareti, mentre altri incastri non analizzati approfonditamente, ma comunque mostrati a pagina 45 svolgevano la funzione di connessione lineare dei tronchi: il più famoso si chiama nella lingua anglosassone “scarf joint” (nodo a sciarpa), e viene tutt’ora utilizzato solitamente per il prolungamento di una trave tramite tassello per il raggiungimento di una luce maggiore, in quanto limitati fisicamente dalla lunghezza dei tronchi.

Avendo dunque compreso affinità e limitazioni tra il blockbau ed il concetto di architettura discreta, vi è da analizzare su quali principi bisognerebbe fondare questo potenziale nuovo sistema progettuale e costruttivo. Nell’ottica dell’economia circolare, della sostenibilità e più in generale tenendo conto dell’attenzione sempre maggiore delle nostre società nei riguardi di un modello di vita ad un minore impatto ambientale dal punto di vista di consumo delle risorse naturali ed energetiche (Commissione Europea, 2019), il potenziale “blockbau discreto” si potrebbe fondare su tre principi cardine:

### **Digitalizzazione**

**Riciclo**

**Riuso**

### **Digitalizzazione**

La questione della digitalizzazione dei processi produttivi è stata ampiamente trattata nei sottocapitoli 3.1 e 3.2 riguardanti la Digital Fabrication e Computational Design; i vantaggi del concetto file-to-factory non sono certamente solo appannaggio dell’approccio discreto, ma fanno riferimento ad una rivoluzione tecnologica del digitale che da più di trent’anni sta interessando tutti i processi dei vari settori produttivi, ed in minima parte oggi giorno anche il settore edilizio. L’iterazione quasi immediata tra la modellazione 3d e la produzione di tale modello nella stampa 3D o nel taglio laser tramite macchina CNC permette un dialogo talmente rapido tra progettazione e produzione che porta a vantaggi in termini di efficientamento della progettazione e taglio dei tempi e costi di produzione quasi inconcepibile sino a pochi decenni fa. Il blocco, dunque, potrebbe essere potenzialmente prodotto da un braccio robotico a 6 assi di rotazione per l’efficientamento in termini di tempo dell’intaglio delle connessioni discrete – appannaggio della digital fabrication – rispetto invece ad utilizzare macchine più tradizionali come le Hundegger – meno precise ed ad un costo orario ben più alto - mentre il

computational design permetterebbe una gestione semplificata della generazione di innumerevoli aggregazioni di blocchi blockbau che comporrebbero la potenziale architettura, di fatto rendendo la modellazione tradizionale 3D totalmente superata.

## Blockbau discreto



NOA \* Network of Architecture - Zallinger Mountain Hut, Bolzano, 2019.  
(fonte: Dezeen 2019)

## Blockbau discreto



NOA \* Network of Architecture - Zallinger Mountain Hut, Bolzano, 2019.  
(fonte: Dezeen 2019)

## Riciclo

Questa caratteristica non è stata trattata nei precedenti capitoli, e di fatto fa riferimento ad una più semplice questione economica. I materiali digitali, nella quasi totalità delle ricerche svolte sino ad ora, trattano dimensioni relativamente contenute nella loro volumetria: spesso le ricerche svolte si interessano ai temi della robotizzazione del cantiere e dell'autocostruzione, dovendo dunque porre attenzione al contenimento dei pesi dei singoli blocchi discreti; inoltre, maggiore è la dimensione del materiale digitale, minore sarà la "risoluzione" dell'architettura. Dunque, anche da un punto di vista meramente geometrico l'approccio discreto sottende velatamente l'utilizzo di componenti di dimensioni contenute; considerando ciò - oltre al fatto che chiaramente essendo un blocco blockbau discreto sarà basato sulla materia legno - vi è da prendere atto che tale blocco dovrebbe essere prodotto partendo da una materia di scarto: tenendo infatti conto del fatto il sistema discreto è ridondante - al contrario del blockbau in cui ogni incastro è utilizzato - chiaramente il numero di incastri da fresare sarà maggiore rispetto a un sistema

tradizionale. Questo svantaggio in termini di costi può essere in parte compensato con i metodi della fabbricazione digitale - come accennato precedentemente - ma potrebbe essere compensato ulteriormente utilizzando appunto dei sottoprodotti dell'industria delle costruzioni in legno. Ad oggi esiste un non indifferente quantitativo di scarti pannelli di CLT - prodotti dal taglio di pareti portanti in legno per l'alloggiamento di finestre e porte - che al momento vengono principalmente venduti dalle aziende di carpenteria lignea ad un basso prezzo per la produzione di truciolato e pellet. Questa valorizzazione estremamente bassa del prodotto porta ad una degradazione di un componente da costruzione perfettamente funzionante - il pannello CLT - in un prodotto ad un costo di mercato inferiore, di fatto andando a perdere tutto lo sforzo attivato nel processo produttivo del componente - e dunque il suo valore aggiunto - e per giunta spendendo risorse in termini energetici, economici e ambientali per la degradazione di tale prodotto in pellet. Tali scarti sono "valorizzati" solitamente in questa maniera in quanto presentano delle

dimensioni troppo contenute per permettere la produzione di elementi architettonici come travi e pilastri, anche se è pur vero che oggi iniziano a essere presenti degli studi al fine di valorizzare maggiormente questi scarti, come nel caso della Recycle-Shell in cui i sottoprodotti dei pannelli di CLT sono stati utilizzati per la produzione di pannelli esagonali per la progettazione di una volta lignea (Robeller et al. 2020). Nel caso del blocco blockbau discreto, dunque, il riciclo di questi sottoprodotti di pannelli di CLT - che raggiungono mediamente lo spessore di 15cm - porterebbe ad una valorizzazione in termini economici ed ambientali ben maggiore rispetto al truciolato, di fatto potendo produrre un nuovo prodotto edilizio senza perdere l'iniziale valore aggiunto e sforzo economico-ambientale speso nella produzione del pannello CLT.

## Blockbau discreto



*Andreas Egger - Sommeratelier - l'intera struttura in legno è stata realizzata utilizzando solo tre dimensioni di legname squadrato grezzo e non trattato, Pest, 2020.  
(fonte: Egger 2020)*

## Blockbau discreto



*Andreas Egger - Sommeratelier - l'intera struttura in legno è stata realizzata utilizzando solo tre dimensioni di legname squadrato grezzo e non trattato, Pest, 2020.  
(fonte: Egger 2020)*

## Riuso

In questo caso il tema è stato ampiamente trattato nel sottocapitolo 4.3 nei termini dell'architettura discreta, ma necessita di una disamina più approfondita. Più nello specifico, nella proposta del Regolamento del Parlamento Europeo e del consiglio che fissa "Condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione" si afferma che i produttori di materiali edilizi dovranno rispettare una serie di obblighi, tra cui la progettazione di prodotti in modo da facilitare la decostruzione il riutilizzo di quest'ultimi (Commissione Europea 2022). A onor del vero, da molti anni si stanno proponendo in maniera sempre più enfatizzata differenti modelli sotto la denominazione di "Architettura per il riuso": nella quasi totalità dei casi, le architetture prodotte vengono definite "per il riuso" semplicemente per il fatto di essere basate su metodi costruttivi a secco, e dunque in linea teorica smontabili e ricostruibili. Un esempio è la Triodos Bank situata nei Paesi Bassi e progettata da RAU Architects: completata nel 2019, questo nuovo quartier generale della Triodos Bank è stato definito come "il primo edificio per uffici su larga scala, interamente rimontabile" e concepito dai progettisti come "una banca dei materiali [...] una combinazione temporanea di prodotti, componenti e materiali" (Dezeen, 2021a). Se

è pur vero che lo studio olandese ha svolto un eccellente lavoro dal punto di vista dell'utilizzo di materia riciclata – quali i frangi sole prodotti parzialmente da plastica riciclata degli oceani – e di riutilizzo di muri di cartogesso (pari a 10.000 m<sup>2</sup>) e più in generale nel porre una grande attenzione verso i temi dell'economia circolare che toccano tutte le fasi dell'edificio, è anche vero che tale modello non può essere definito nel quadro della progettazione reversibile solamente perchè "[...] consente il riutilizzo dei materiali da costruzione [...] in quanto l'edificio è stato costruito utilizzando legno lamellare e legno CLT che viene unito tra loro mediante viti, il che significa che essere svitati e riutilizzati." (Dezeen, 2021b). Il parallelismo costruzione a secco = architettura per il riuso è da tempo promulgata nel dibattito architettonico contemporaneo, eppure ci si dovrebbe domandare cosa si intende con il termine "architettura per il riuso". Secondo la Commissione Europea, l'aggettivo "riuso" nel contesto del mondo delle costruzioni si riferisce a

*"any operation by which a product or its components, having reached the end of their first use, are used for the same purpose for which they were conceived."*  
(Commissione Europea 2022, p. 60)

*"qualsiasi operazione con cui un prodotto o i suoi componenti, giunti al termine del loro primo utilizzo, vengono impiegati per lo stesso scopo per cui erano stati concepiti"*

La Commissione Europea affianca spesso alla denominazione "prodotto delle costruzioni per il riuso" una seconda tipologia indipendente, definita come "prodotto rifabbricato/rigenerato", il quale viene considerato sotto questa denominazione se:

*"[...] The transformative process, whilst going beyond repair, cleaning or regular maintenance or preparing for re-use [...] after being de-installed, does not jeopardise the compliance with this Regulation or the performance of the product in relation to the relevant. Where the economic operator has used this derogation, the declaration of performance shall be labelled "declaration of performance for re-manufactured product"."*  
(Commissione Europea 2022, p. 50)

*"[...] Il processo di trasformazione, pur andando oltre la riparazione, la pulizia o la manutenzione regolare o la preparazione per il riutilizzo [...] dopo essere stato disinstallato, non mette a rischio la conformità al presente regolamento o le prestazioni del prodotto in relazione alle caratteristiche pertinenti. Se l'operatore economico si è avvalso di questa deroga, la dichiarazione di prestazione deve recare la dicitura "dichiarazione di prestazione per il prodotto rifabbricato"."*

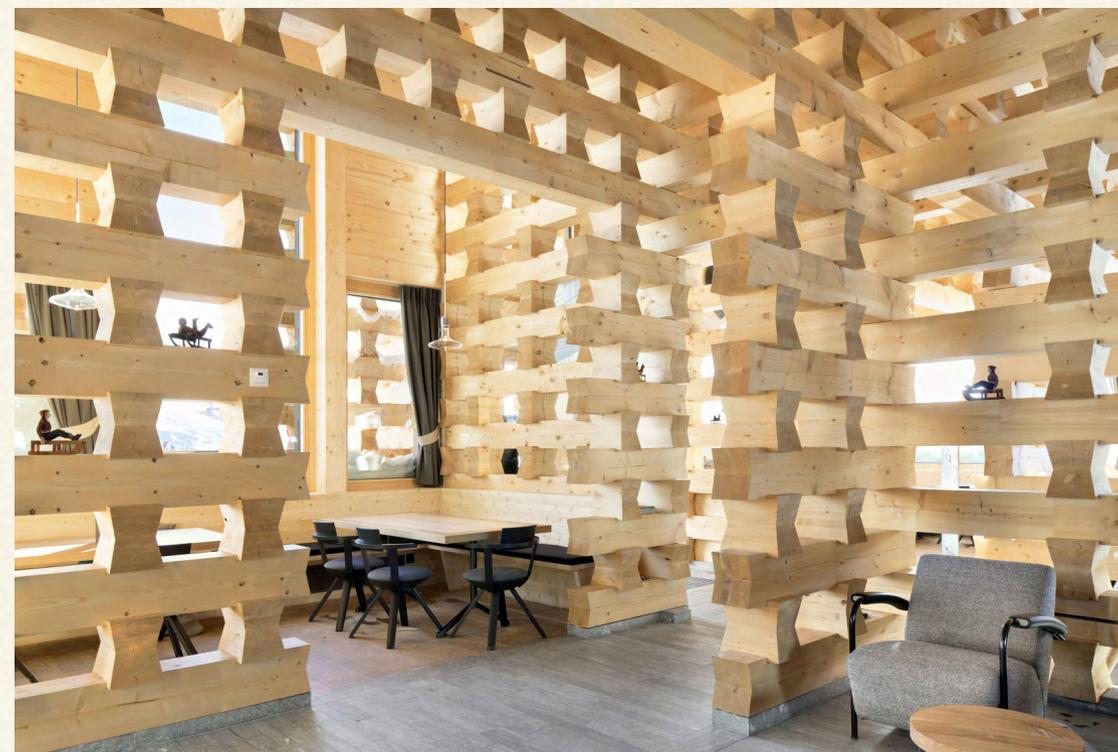
Avendo dunque chiara la definizione di prodotto "per il riuso" e prodotto "rifabbricato", diventa chiaro come una simbolica Triodos Bank non possa essere di certo definita come "architecture for reuse". Al più può essere definita "architecture TO reuse", ma di fatto il principio teorico secondo cui un'architettura è modulare ed assemblata a secco non implica che essa sia automaticamente per il riuso. Prendendo sempre ad esempio l'opera progettata da RAU Architects, l'edificio è composto da 132 componenti in legno standardizzati (European Circular Economy Stakeholder Platform 2021, p. 21), di fatto ognuno di essi con una specifica funzione – come trave per carichi orizzontali e pilastri per carichi verticali – ma soprattutto ognuno di essi con una specifica forma, campata, geometria e sezione. Ciò significa che la libertà presa dai progettisti nella scelta di produrre decine di travi angolari in legno lamellare a sbalzo di dimensione 3x4 metri risulterà sicuramente un risultato formale e compositivo estremamente affascinante, ma al tempo stesso ricadrà come una fortissima limitazione verso le successive generazioni di progettisti che tra ottant'anni dovranno smantellare il manufatto edilizio e riutilizzare tali componenti. Con quale arroganza, ci si dovrebbe domandare, ci si arroga il diritto di decidere

## Blockbau discreto



Giubbini Architekten - Mottahütte, Lenzerheide, 2017.  
(fonte: Giubbini 2017)

## Blockbau discreto



Giubbini Architekten - Mottahütte, Lenzerheide, 2017.  
(fonte: Giubbini 2017)

noi quale componente è da produrre in maniera personalizzata per il proprio specifico progetto – chiaramente secondo le nostre più dettagliate necessità in termini di dimensione, sezione, forma – per poi disinteressarsi completamente di come tali componenti dovrebbero essere potenzialmente riutilizzati in una nuova e differente architettura? Chiaramente questo grattacapo viene lasciato alle generazioni future, liquidando la faccenda con una superficiale equazione per cui “architettura decostruibile = architettura per il riuso”. Non dovremmo avere nessuna autorità, o per meglio dire privilegio, nell’assumere che la trave lamellare in legno a doppia curvatura di dimensione 8.6 metri per 1.5 sia un “componente riutilizzabile”: certamente può essere rimontato e riusato in una nuova architettura, ma tale architettura futura dovrà essere pensata con già la limitazione progettuale di dover sviluppare obbligatoriamente delle campate pari a 8.6 metri, oppure dovendo tagliare e parcellizzare – con successivi scarti – la trave totale in travetti più piccoli, ma in questo caso si tratterebbe dunque di prodotti rifabbricati e non per il riuso. Come l’architetto di oggi ha la libertà di poter scegliere l’altezza dell’interpiano del proprio manufatto, così dovrebbe fare anche il futuro architetto che riutilizza i suoi componenti.

Questa breve parentesi critica nei riguardi dell’architettura per il riuso odierna potrà risultare come una mera speculazione accademica, ma nella realtà dei fatti il mondo delle costruzioni rispecchia esattamente tale criticità: se da un lato il settore AEC sta dimostrando in maniera sempre più virtuosa che il riciclaggio di materiali da costruzione – come per esempio l’utilizzo di aggregati riciclati come riempitivi per solette o per la produzione di nuovi prodotti edilizi – è una realtà sempre più forte dal punto di vista della scalabilità e dell’economicità delle risorse risparmiate, al tempo stesso gli edifici basati sul concetto del riuso faticano a decollare, rimanendo spesso dei progetti simbolici estremamente affascinanti ma intrinsecamente difficilmente scalabili. Se dunque oggi stesso il sistema del riuso fatica ad emergere – e ci si dovrebbe domandare il perché, in quanto è matematicamente più vantaggioso dal punto di vista economico rispetto al riciclaggio, di cui si devono tenere in conto i costi aggiuntivi delle fasi di riprocessamento della materia – forse la motivazione risiede nel fatto che i componenti che vengono riutilizzati, non sono affatto progettati per essere riutilizzati, al più sono ideati per essere smontati e rimontati nella medesima composizione iniziale.

*Sulla base di questi principi è nato LokAlp,  
il blocco blockbau discreto.*

## 5.2 LokAlp

LokAlp è un metodo di progettazione e costruzione a secco basato su blocchi standardizzati lignei. Questi “digital materials” formano un sistema di interconnessione ad incastri lignei, il cui principale scopo è la produzione di un sistema costruttivo che faciliti la messa in opera da parte degli operatori ed al tempo stesso massimizzi i potenziali di una vera architettura per il riuso per le future generazioni di architetti. Rispetto ai molteplici materiali digitali progettati sino ad ora, LokAlp ha l’obiettivo di voler sviluppare un sistema scalabile che possa produrre effettivamente una scala architettonica che non si limiti al mero padiglione: la

maggioranza dei materiali digitali inventati sino ad ora, infatti, pur condividendo la medesima materia prima del legno hanno la condivisa problematica di sviluppare dei sistemi costruttivi caratterizzati da una forte permeabilità, come mostrato nelle pagine precedenti da 146 a 149. Tenendo conto del fatto che LokAlp si ispira alla massiva architettura lignea blockbau, l’intento è stato quello di ricercare una forma geometrica che potesse produrre una parete a blocchi senza discontinuità, ed al tempo stesso che si utilizzassero delle interconnessioni che si ispirassero alla tradizione della carpenteria lignea europea.

*An interlocking system from the Alps:  
LokAlp.*

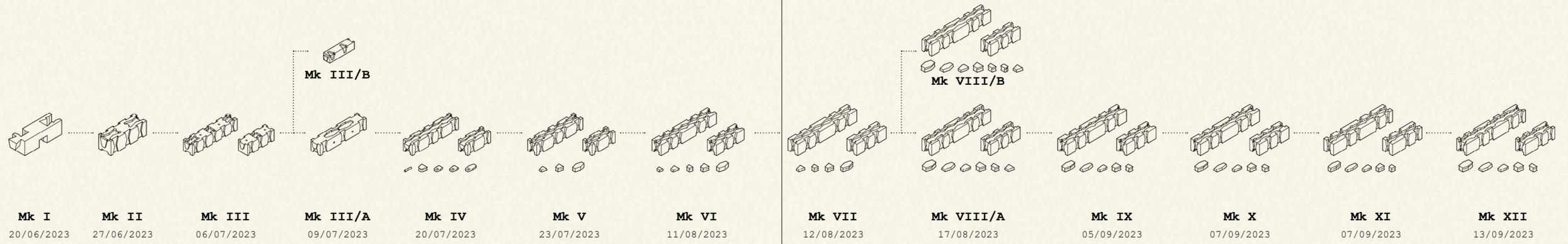
### 5.2.1 Progettazione

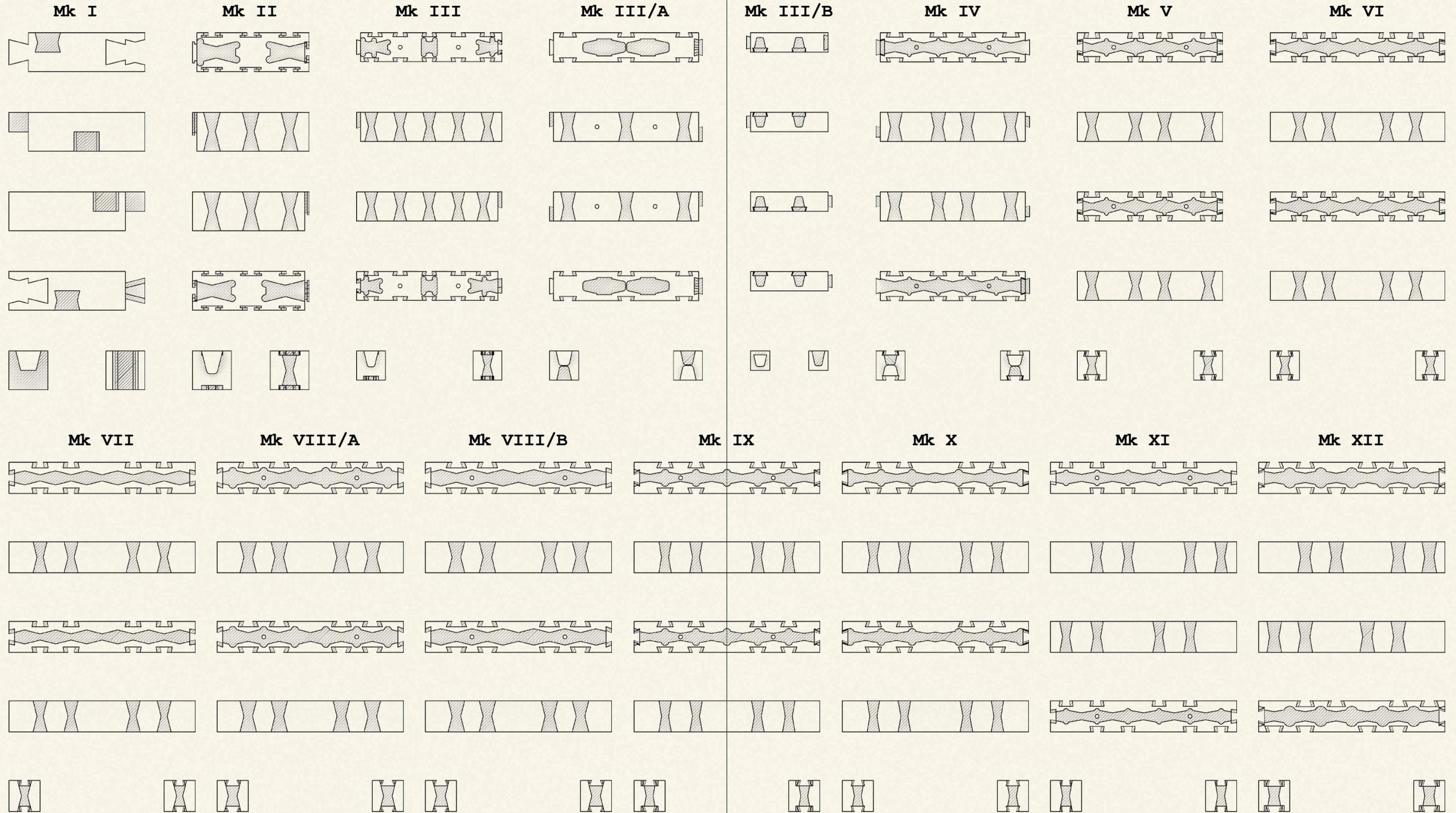
La progettazione del blocco discreto blockbau “LokAlp” è stata guidata da differenti parametri che tenessero conto non solamente le potenzialità compositive, ma anche e soprattutto questioni legate all’economia e alla sostenibilità.

Innanzitutto, a livello compositivo, la progettazione del blocco è partita dal modulo cubico: la dimensione del lato del modulo è cambiata nel tempo, passando da 20cm di lato a 15, 10 sino a 16cm. Tale dimensione è stata parametrizzata in quanto legata alla disponibilità di spessori di pannelli di CLT disponibili, e comunque non avrebbe influenzato particolarmente la progettazione. Partendo dal modulo cubico, dunque, si è decisa la lunghezza del blocco, inizialmente pari a 60cm (3 unità cubiche da 20cm) per poi modificarsi nel tempo sino a raggiungere la lunghezza di 96cm (6 unità cubiche da 16cm). La lunghezza totale del blocco, inoltre, teneva conto anche del peso massimo del componente edilizio, che sarebbe

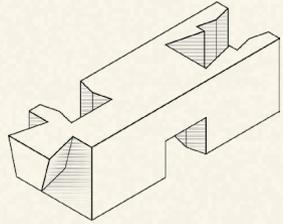
dovuto rimanere sotto circa i 10kg per unità per una facile movimentazione da parte degli operatori e dei possibili bracci robotici.

Oltre alla parte compositiva, è stato necessario trovare un equilibrio tra il numero totale di connessioni - che avrebbe massimizzato le potenzialità combinatorie - e il relativo scarto generato da queste ultime. Infine, la progettazione del blocco ha dovuto basarsi sul fatto che le macchine produttive a disposizione sarebbero state delle macchine a controllo numerico a 3 o 5 assi oppure dei bracci robotici: in entrambi i casi l’intaglio degli incastri sarebbe stato svolto tramite la fresatura del blocco vergine, e dunque è stato essenziale per la progettazione di ogni blocco valutare a livello tecnico quale percorso la punta di fresa avrebbe svolto per l’intaglio degli incastri. Di seguito verranno riportate le differenti evoluzioni (e involuzioni) del blocco LokAlp, oltre che le differenti comparazioni delle potenzialità combinatorie.

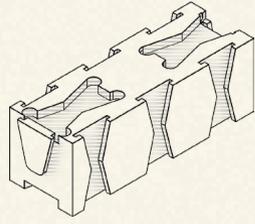




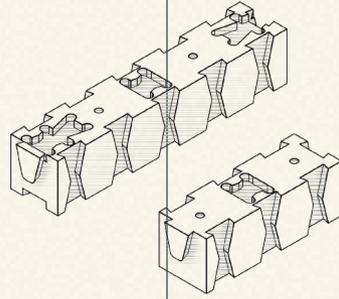
Mk I



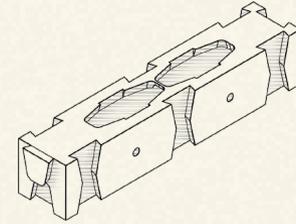
Mk II



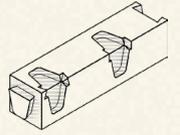
Mk III



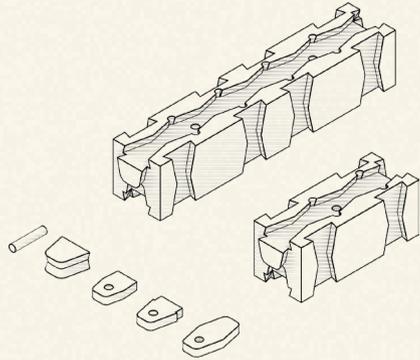
Mk III/A



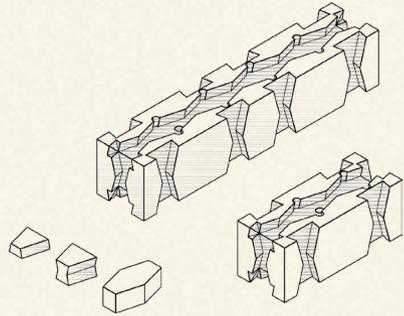
Mk III/B



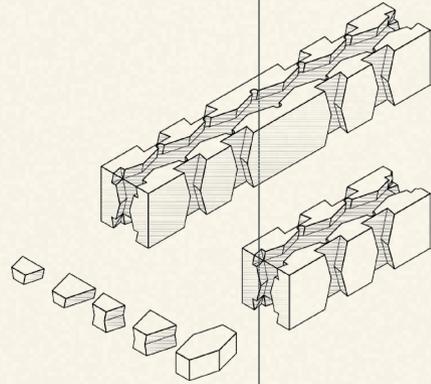
Mk IV



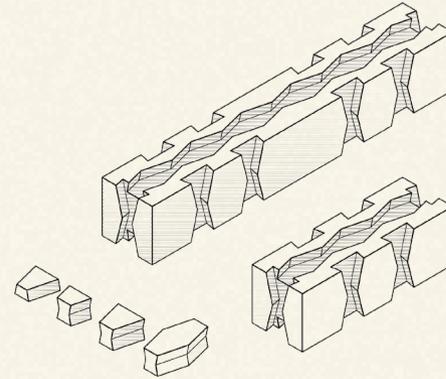
Mk V



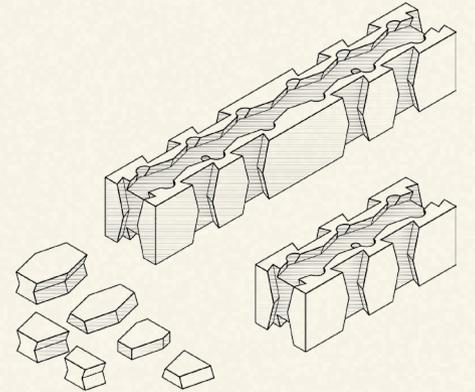
Mk VI



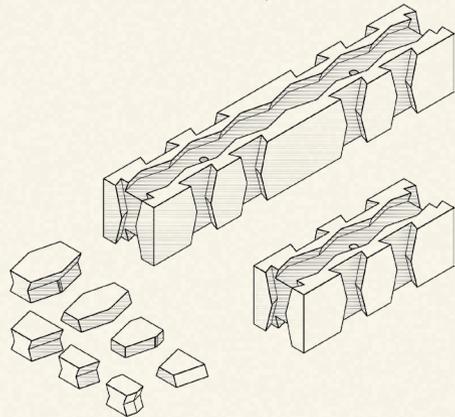
Mk VII



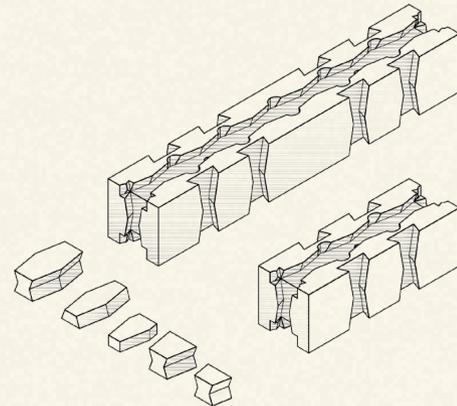
Mk VIII/A



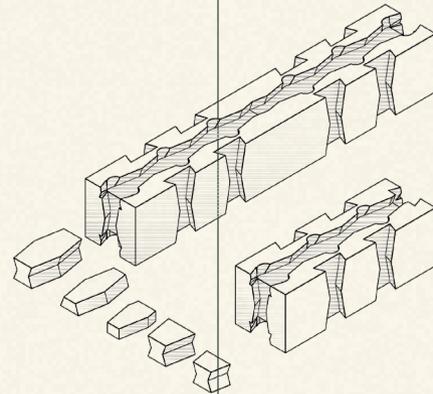
Mk VIII/B



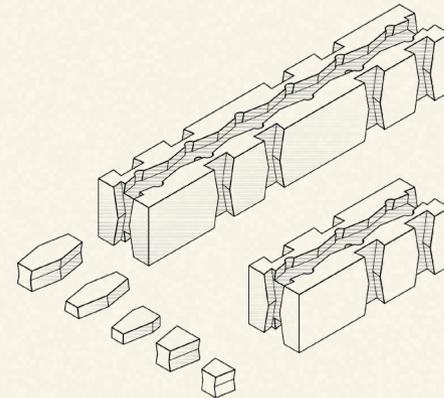
Mk IX



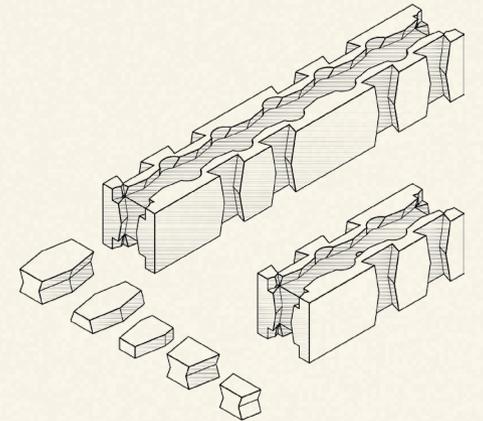
Mk X

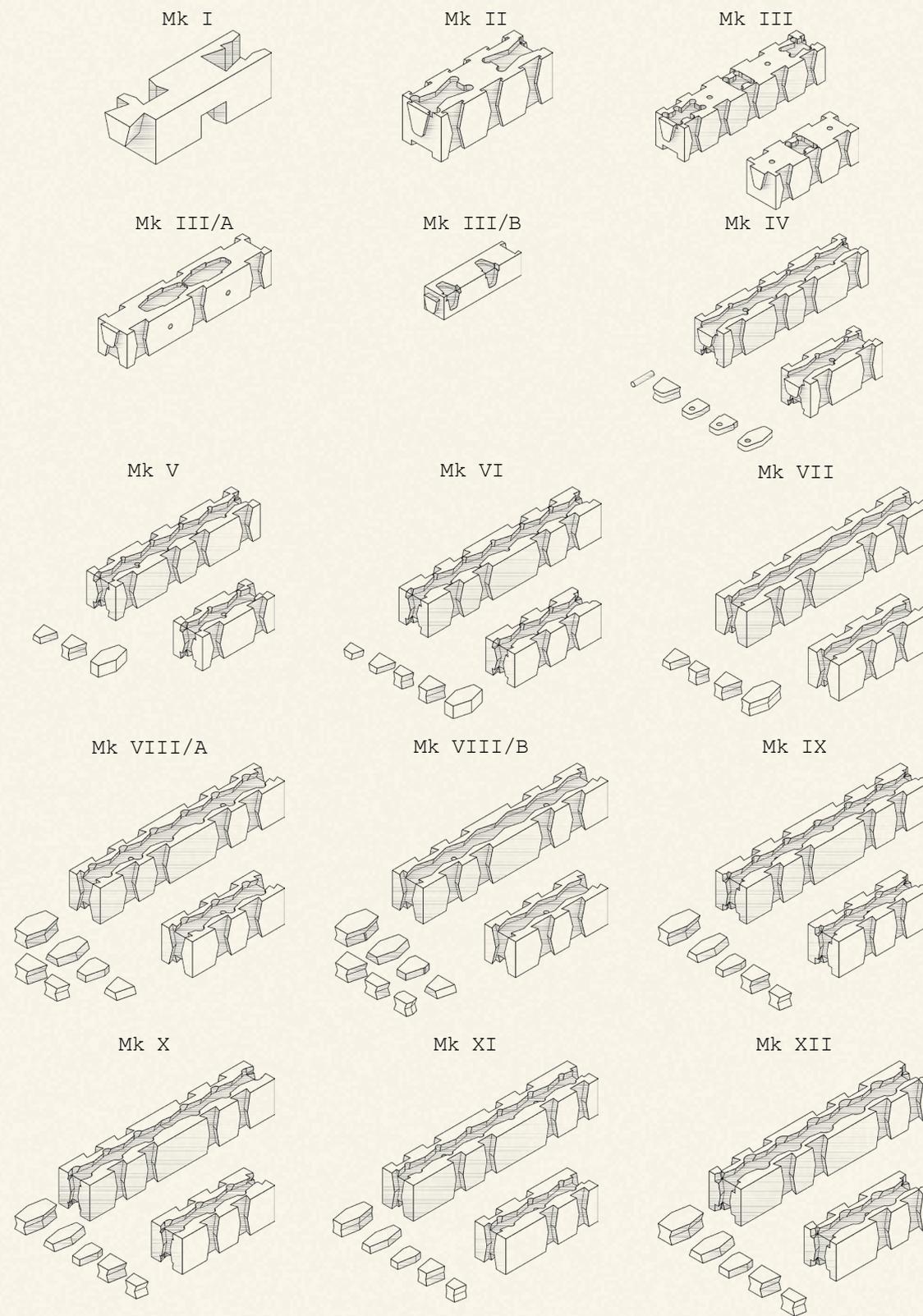
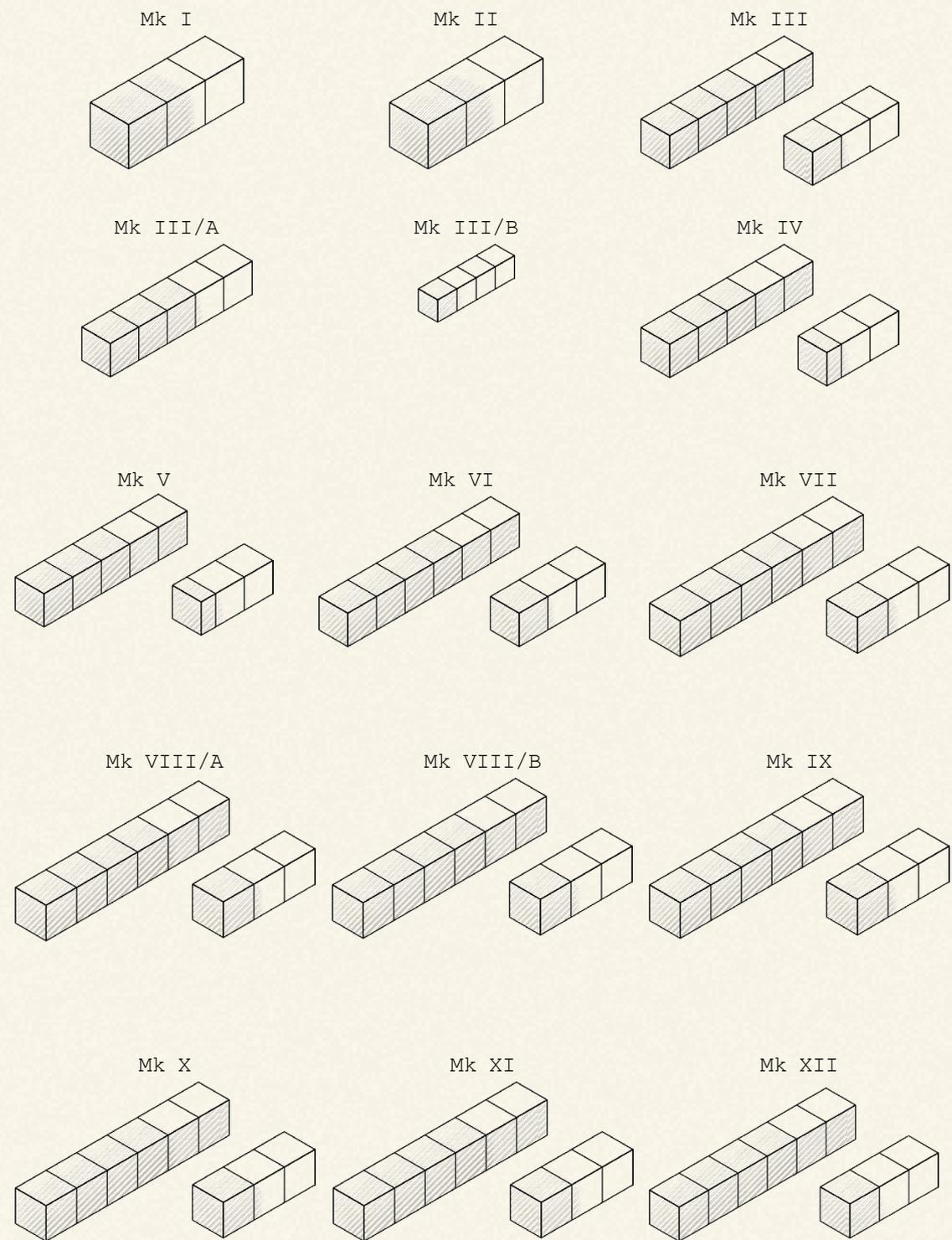


Mk XI



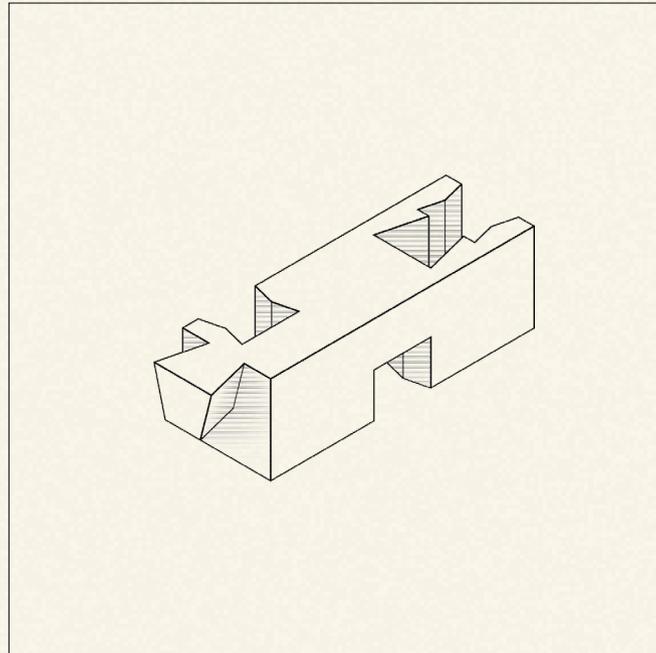
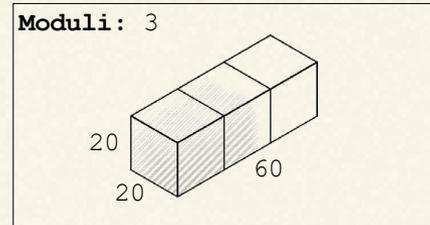
Mk XII



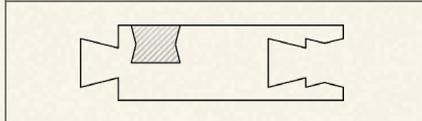


# LokAlp Mk I

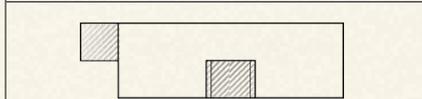
Modello	Mark I
Data	20/06/2023
Incastri	15
Scarto %	35.71%
Peso	8.10kg



Superiore scala 1:20



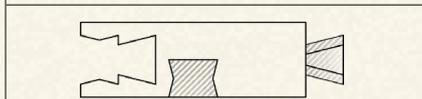
Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

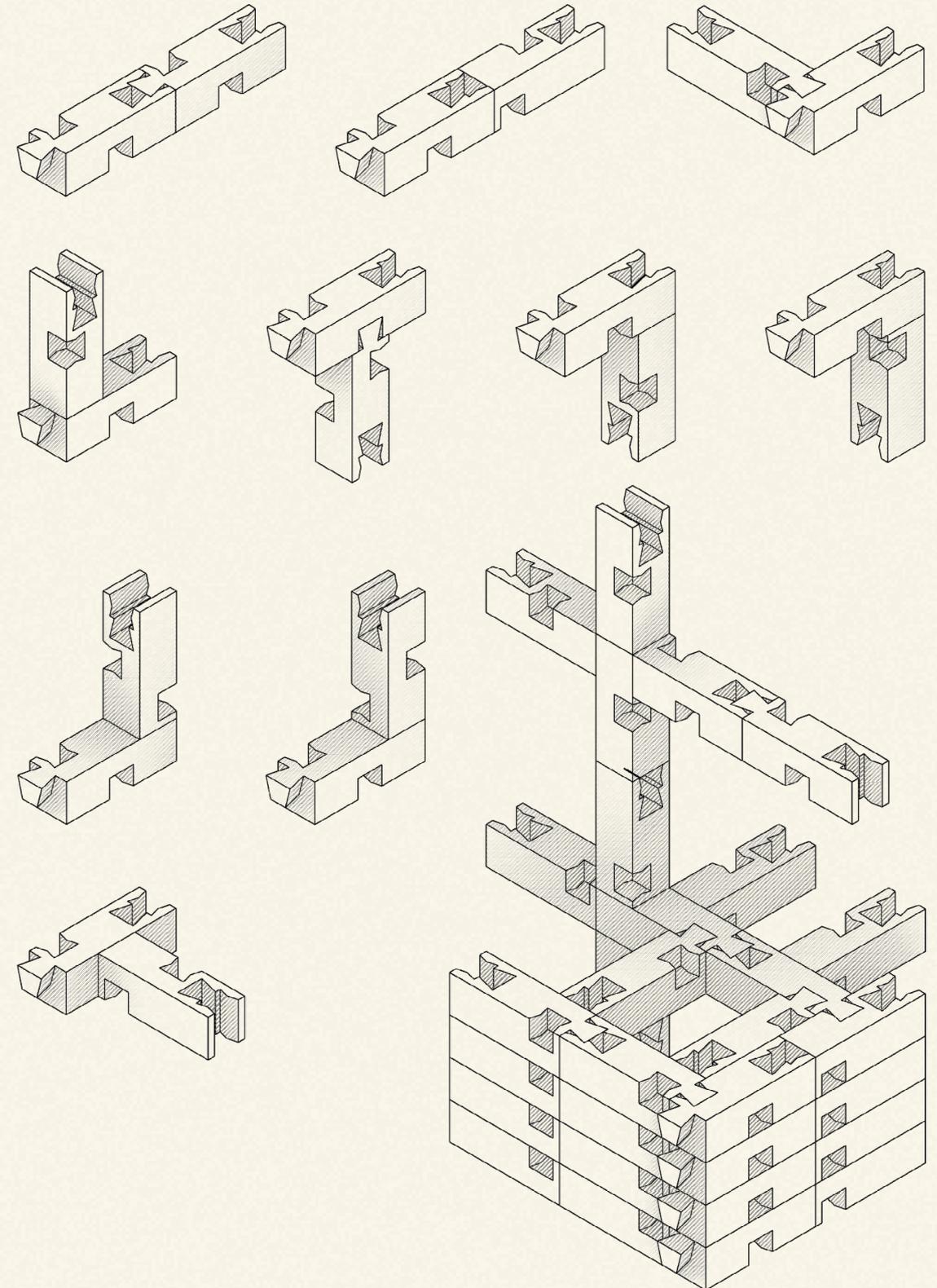


## Modifiche

- Blocco di partenza di 70cm
- Utilizzo di coda di rondine in incastri a doppia direzione

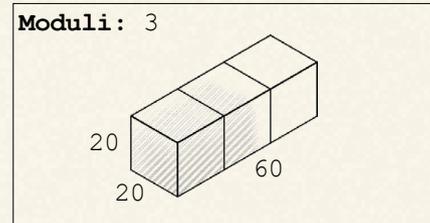
## Commenti

Blocco non ingegnerizzato per la produzione tramite macchina CNC con lama rotante. No possibilità nodo a tre vie, solo nodo due vie. Presenza attacco maschio solo da un lato, non permette ancoraggio corretto in entrambi i lati nelle travi secondarie. Alto quantitativo di scarto (36%). Limitata composizione. Potenziali punti deboli nell'attacco femmina a tripla coda di rondine.

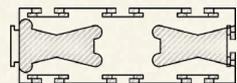


# LokAlp Mk II

Modello	Mark II
Data	27/06/2023
Incastri	23
Scarto %	18.55%
Peso	8.80kg



Superiore scala 1:20



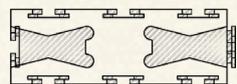
Laterale 1 scala 1:20



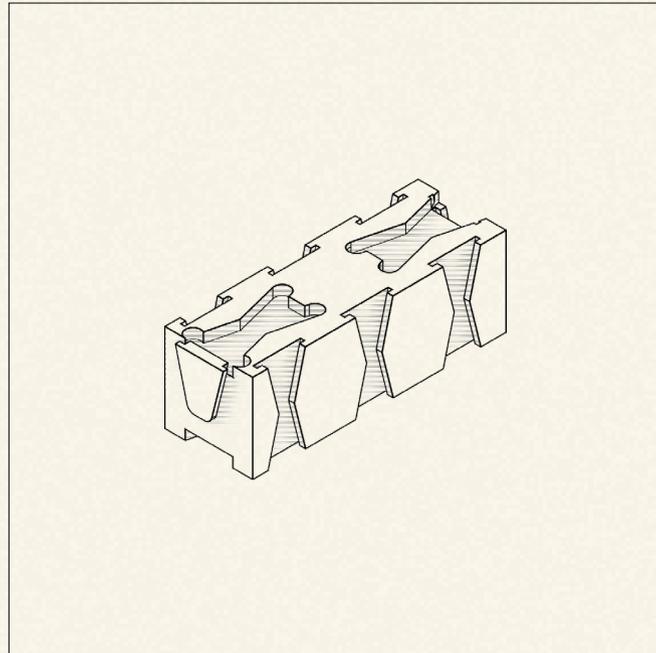
Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

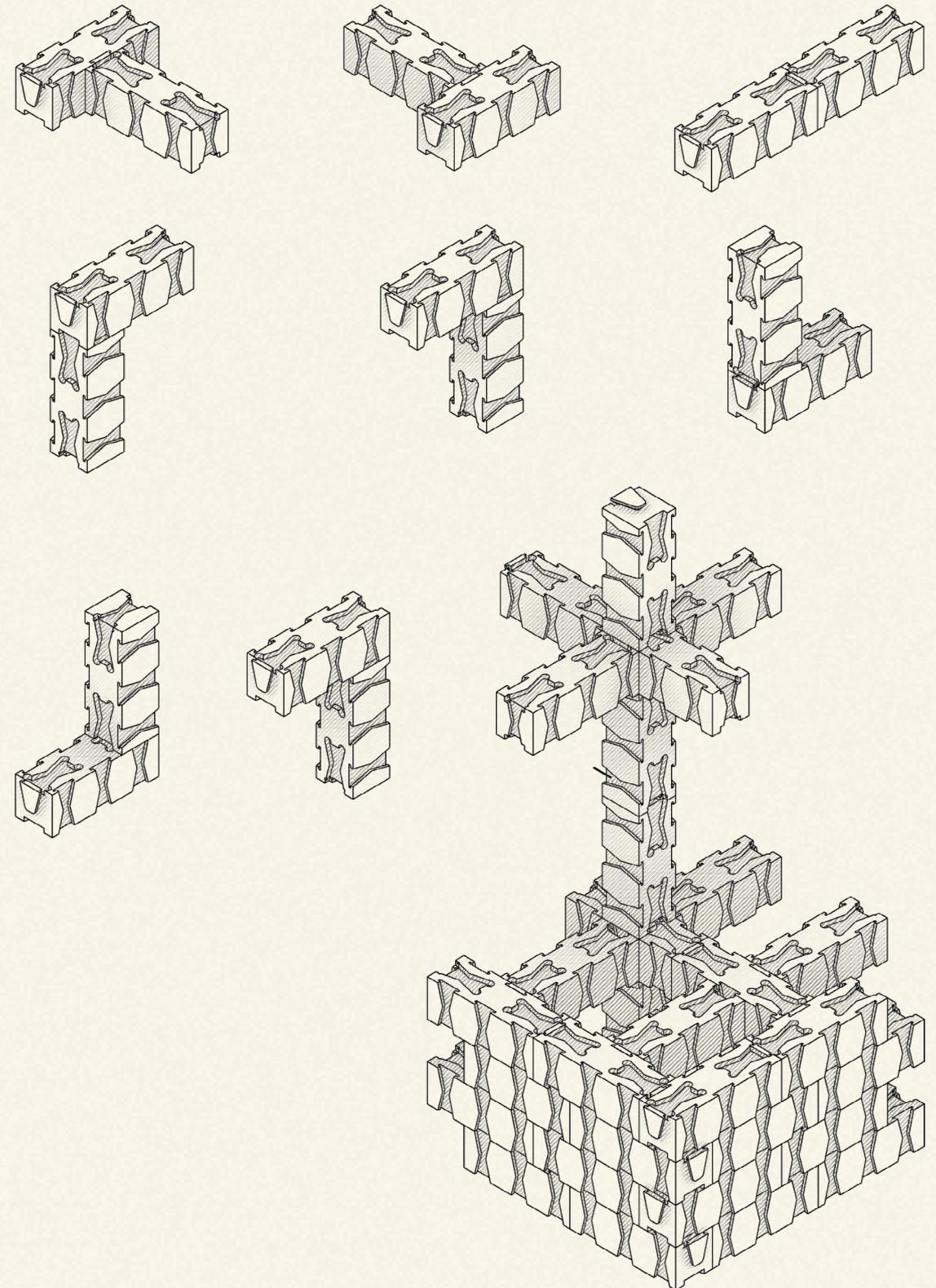


## Modifiche

- Blocco di partenza 60cm
- Implementazione connessioni laterali "a clessidra"
- Implementazioni connessioni verticali

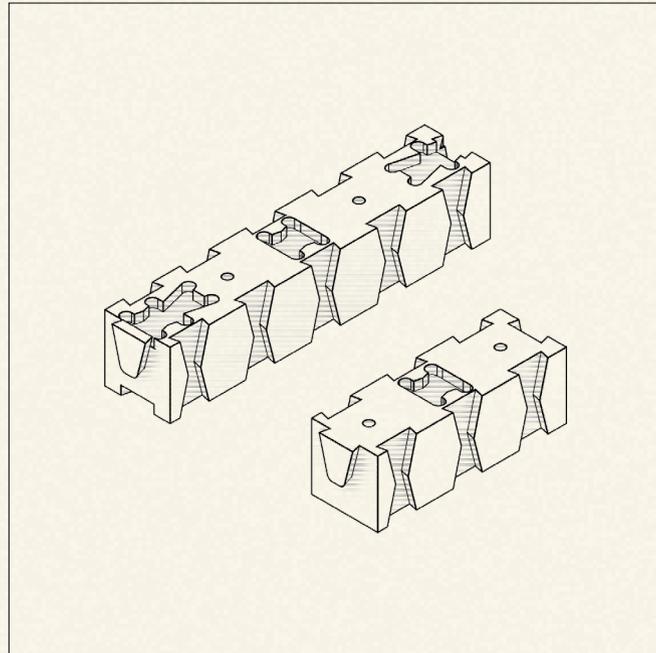
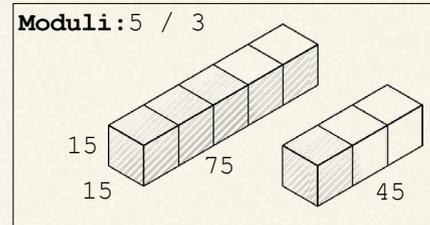
## Commenti

Blocco ingegnerizzato per la produzione con lama CMT 850.602.11. Aumento peso di 200gr rispetto a Mk I. 26 combinazioni disponibili rispetto a 12 disponibili del Mk I. Possibilità di fresatura maniglia al centro del blocco per facilitazione di manovra di operatore umano e/o braccio robotico. Ottima la specularità quasi totale del blocco. Presenza attacco maschio solo da un lato, non permette ancoraggio corretto in entrambi i lati nelle travi secondarie. 18-23% di scarto vs 36% di scarto del Mk I. Possibile punto debole nella punta della coda di rondine.

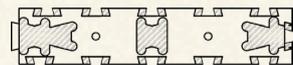


# LokAlp Mk III

Modello	Mark III
Data	06/07/2023
Incastri	37
Scarto %	16.76%
Peso	6.09kg



Superiore scala 1:20



Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

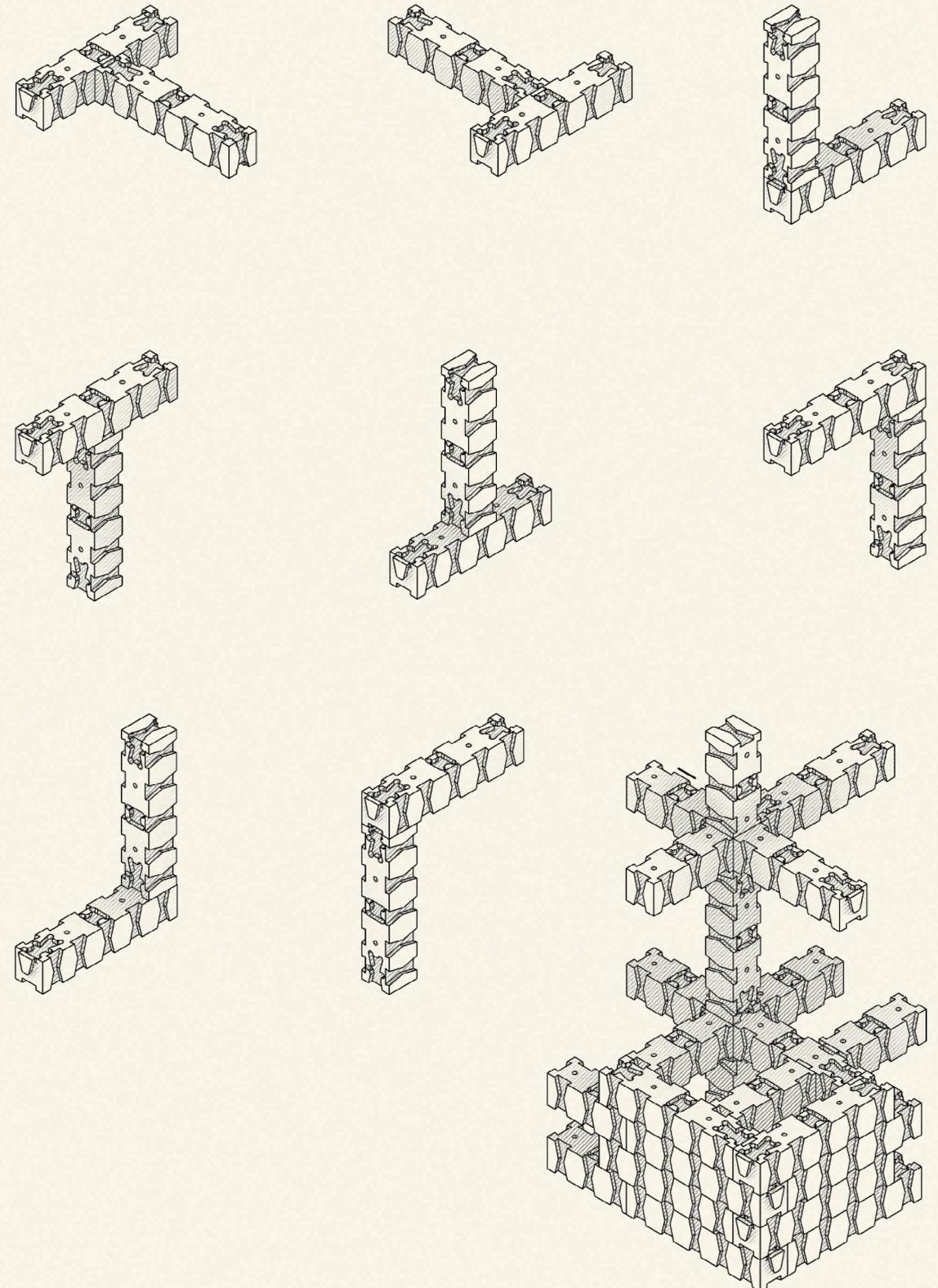


## Modifiche

- Aumento lunghezza blocco a 5 unità
- Modifica connessioni verticali
- Aumento connessioni laterali

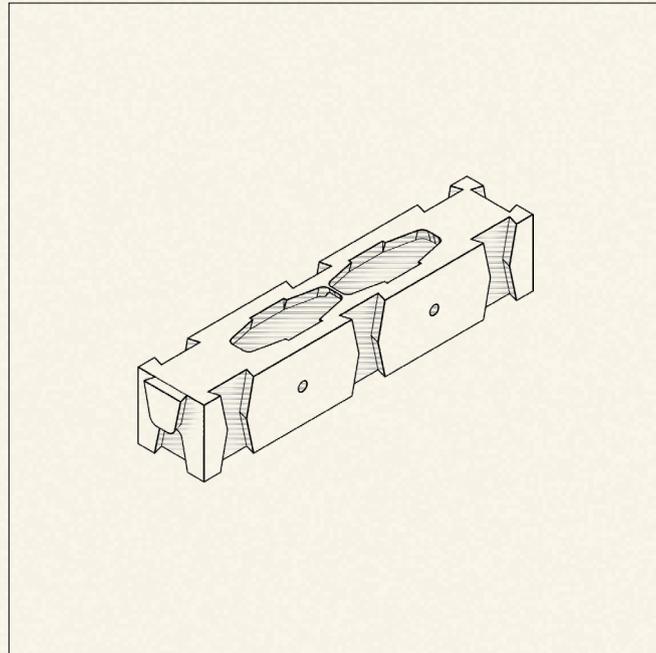
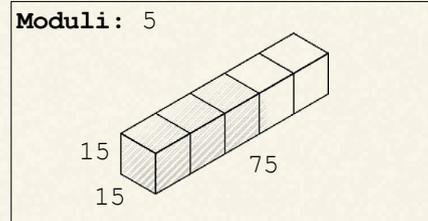
## Commenti

Blocco ingegnerizzato per fresa a coda di rondine.  
 Blocco corto aumenta il potenziale combinatorio. Presente ancora punto debole in maschio coda di rondine parte superiore. Presente ancora singolo maschio di rondine che non permette corretto incastro in entrambi i lati delle travi. Nodo a tre vie possibile. Incastri verticali utili per la messa in opera ma non permettono il vincolaggio lungo asse Z.

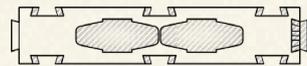


# LokAlp Mk IIIA

Modello	Mark III/A
Data	09/07/2023
Incastri	22
Scarto %	20.47%
Peso	6.30kg



Superiore scala 1:20



Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

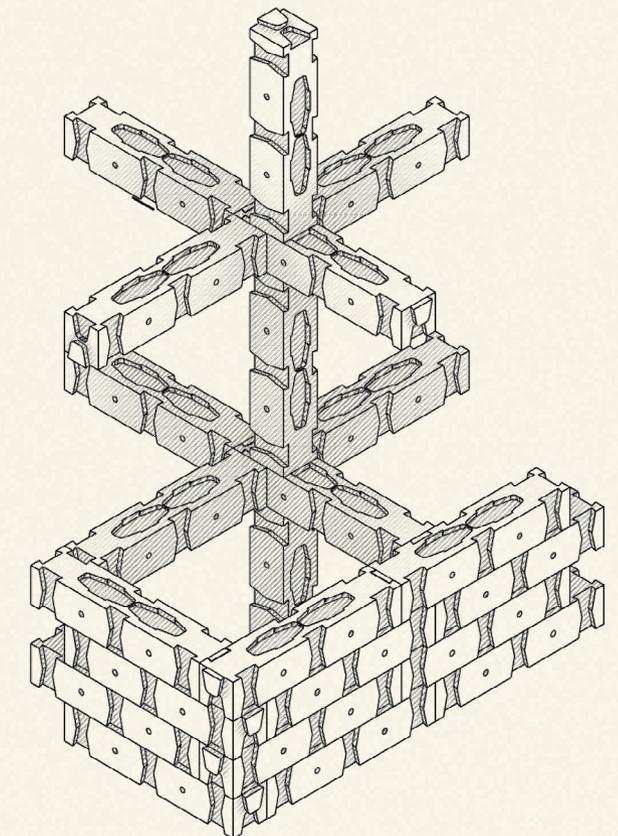
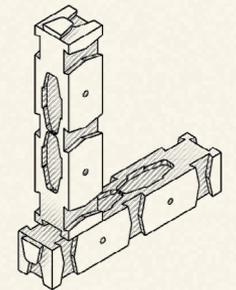
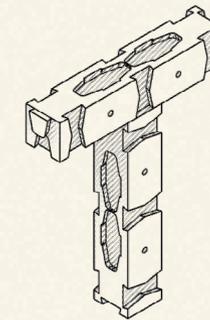
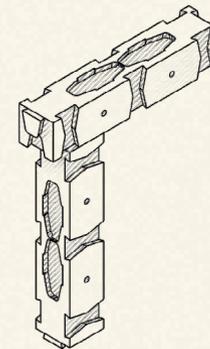
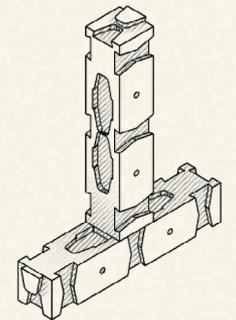
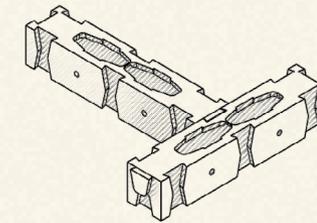
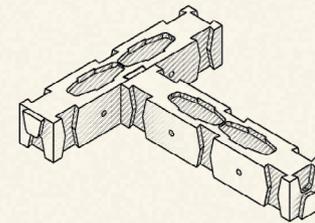


## Modifiche

- Modifica connessioni verticali
- Riduzione connessioni orizzontali
- Aggiunta +1 maschio di coda di rondine lato corto

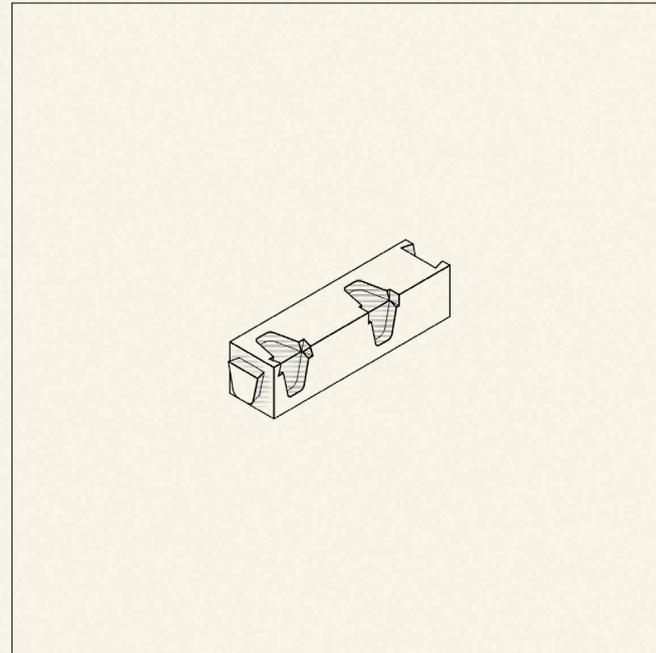
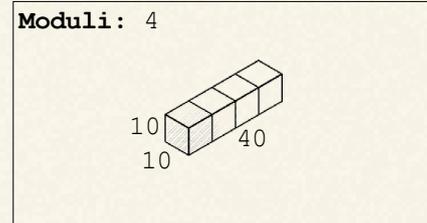
## Commenti

Presenza del doppio maschio coda di rondine permette il corretto incastro trave secondaria. Assenza del mezzo blocco limita la libertà combinatoria. "Ponte" di legno nella parte centrale superiore del blocco da rimuovere in quanto punto debole. Risolto punto debole del maschio coda di rondine. Possibilità nodo a tre vie solamente nella parte centrale del blocco, mentre nelle altre combinazioni la connessione delle travi orizzontali è sfalsata rispetto al pilastro. Possibile limitazione di combinazione per la creazione di apertura in quanto il maschio di coda di rondine può compenetrare il blocco.

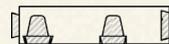


# LokAlp Mk III<sub>B</sub>

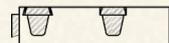
Modello	Mark III/B
Data	09/07/2023
Incastri	10
Scarto %	20.81%
Peso	1.50kg



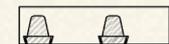
Superiore scala 1:20



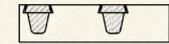
Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

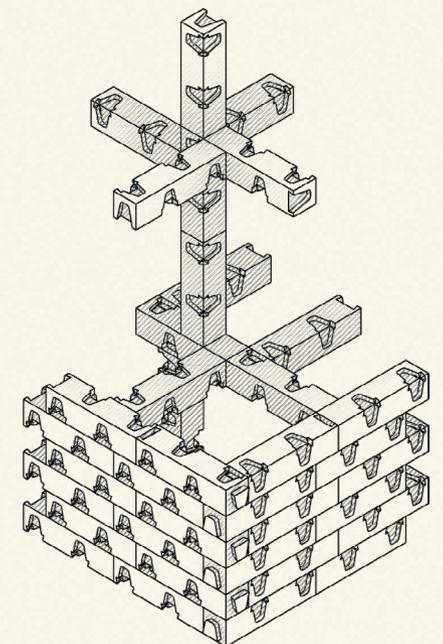
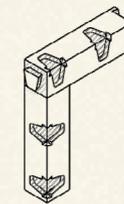
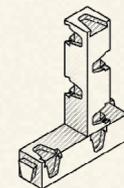
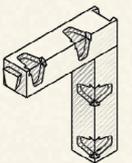
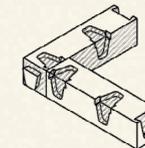
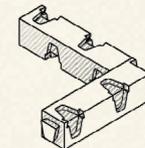
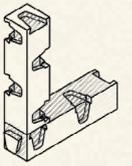
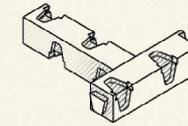
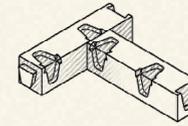


## Modifiche

- Riduzione dimensionamento modulo a lato 10cm
- Riduzione moduli a 4 unità
- Nuova opzione angolare per connessioni
- Rimozione secondo maschio

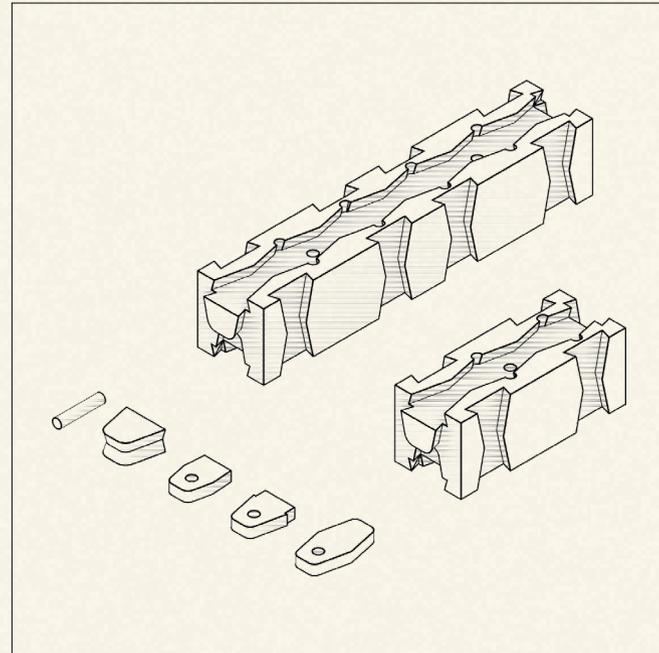
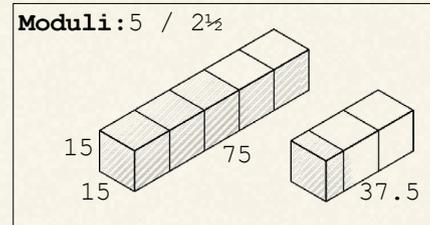
## Commenti

Assemblaggio complicato dalla poca simmetria del blocco. Attacco maschio solamente da un lato non permette il corretto incastro in entrambi i lati delle travi secondarie. No possibilità incastro a tre vie. No possibilità di incastro a due vie in quanto non è possibile l'assemblaggio. No possibilità incastro trave - pilastro. Dimensione lato minimo 10cm troppo corta per la scala architettonica.

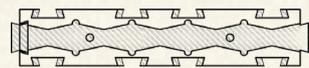


# LokAlp Mk IV

Modello	Mark IV
Data	20/07/2023
Incastri	38
Scarto %	27.73%
Peso	5.81kg



Superiore scala 1:20



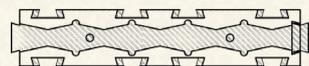
Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

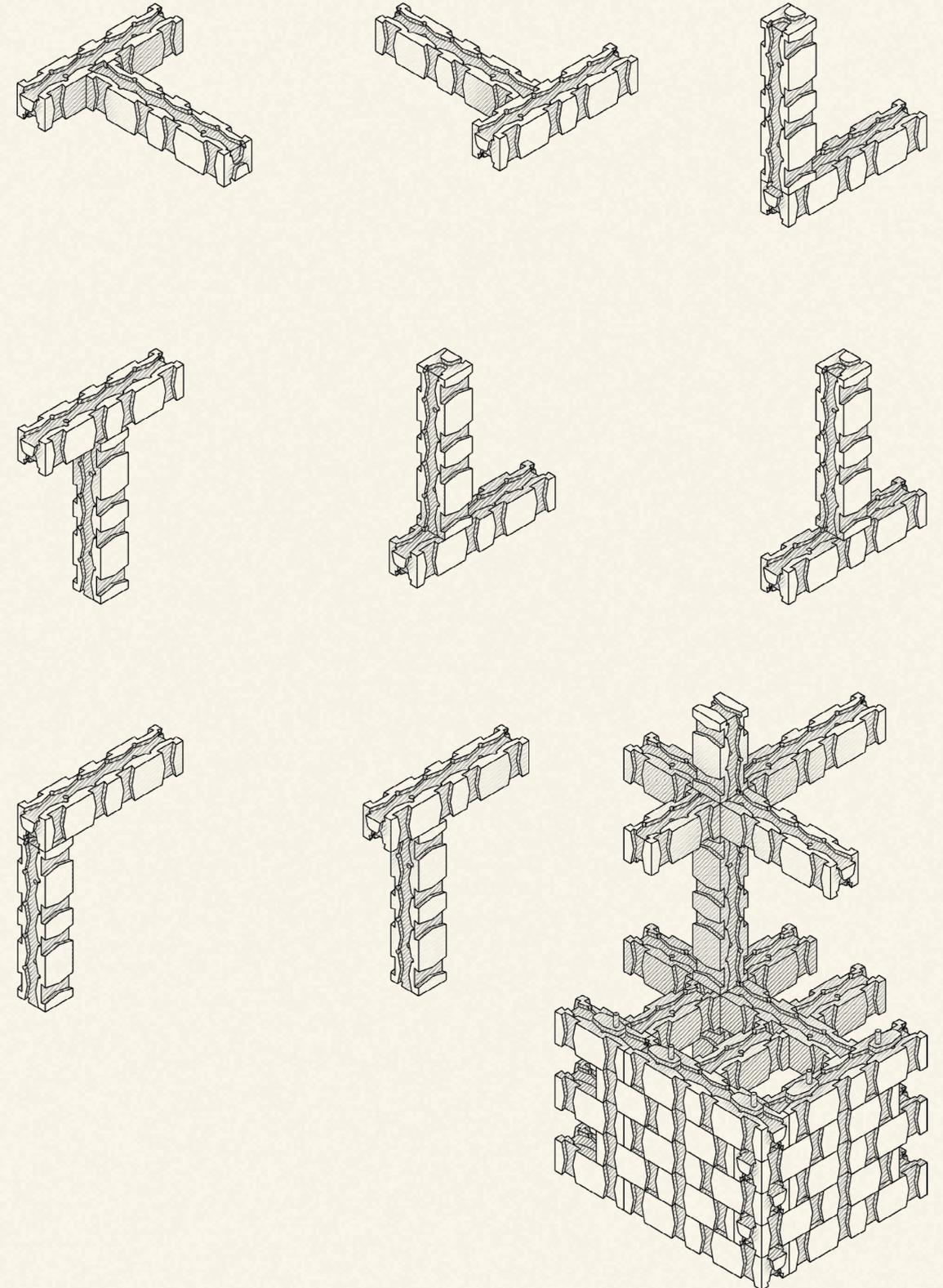


## Modifiche

- Nuova tipologia di connessione superiore e inferiore
- Aggiunta connessioni laterali
- Implementazione concetto "biscotti"
- Implementazione "mezzo blocco"

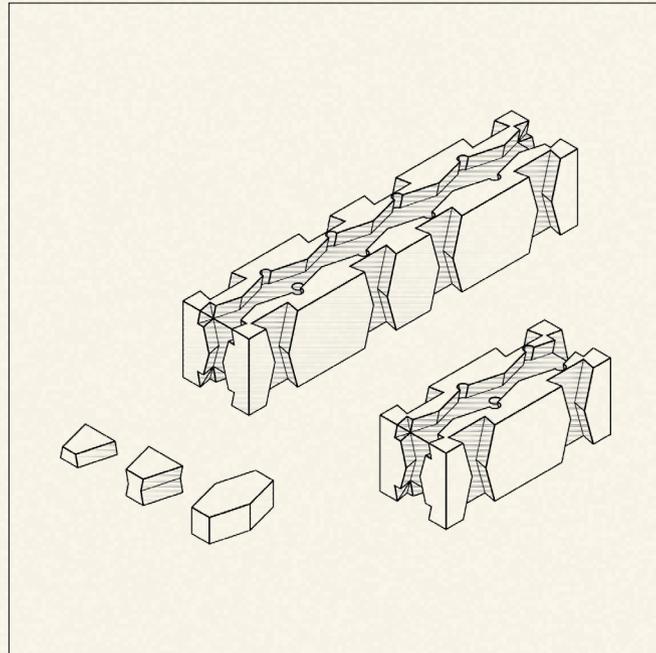
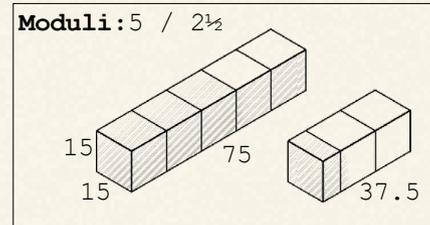
## Commenti

Possibilità incastro nodo a tre vie solamente nelle parti terminali del blocco. Incastro a tre vie sfalsato nella parte centrale del blocco. Implementazione dei biscotti permette una connessione più salda tra i vari livelli della muratura. Biscotto maschio coda di rondine permette corretta connessione in entrambi i lati del mezzo blocco. Fresatura continua nelle facce superiori - inferiori aumenta il potenziale combinatorio. Risolto il problema di penetrazione del blocco del Mk IV/A per la composizione di aperture.

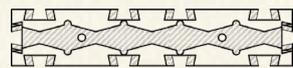


# LokAlp Mk V

Modello	Mark V
Data	23/07/2023
Incastri	40
Scarto %	28.19%
Peso	5.45kg



Superiore scala 1:20



Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

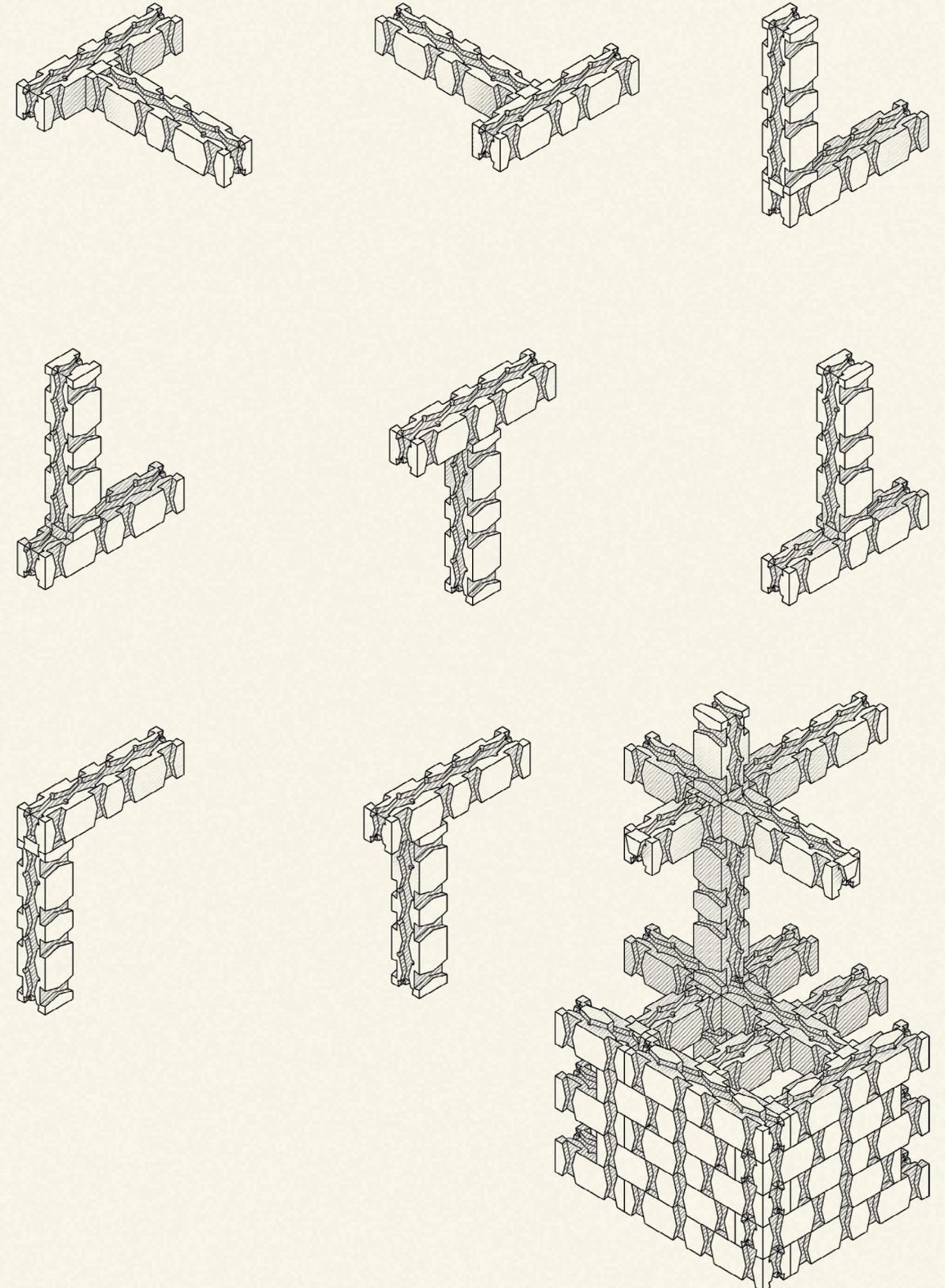


## Modifiche

- Rimozione maschi coda di rondine (sostituiti da biscotti)
- Modifica tipologia biscotti

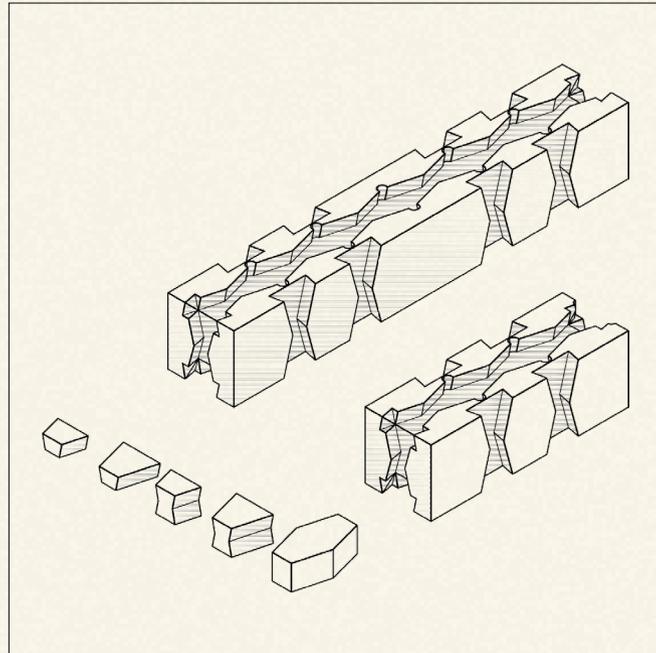
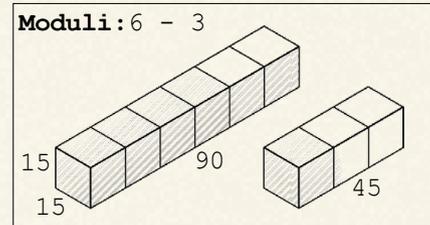
## Commenti

Possibilità nodo a tre vie. Incastro ad angolo pulito senza maschio coda di rondine.

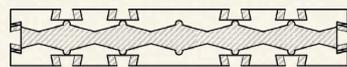


# LokAlp Mk VI

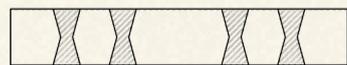
<b>Modello</b>	Mark VI
<b>Data</b>	11/08/2023
<b>Incastri</b>	44
<b>Scarto %</b>	25.66%
<b>Peso</b>	6.75kg



Superiore scala 1:20



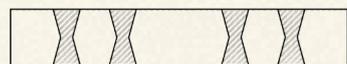
Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

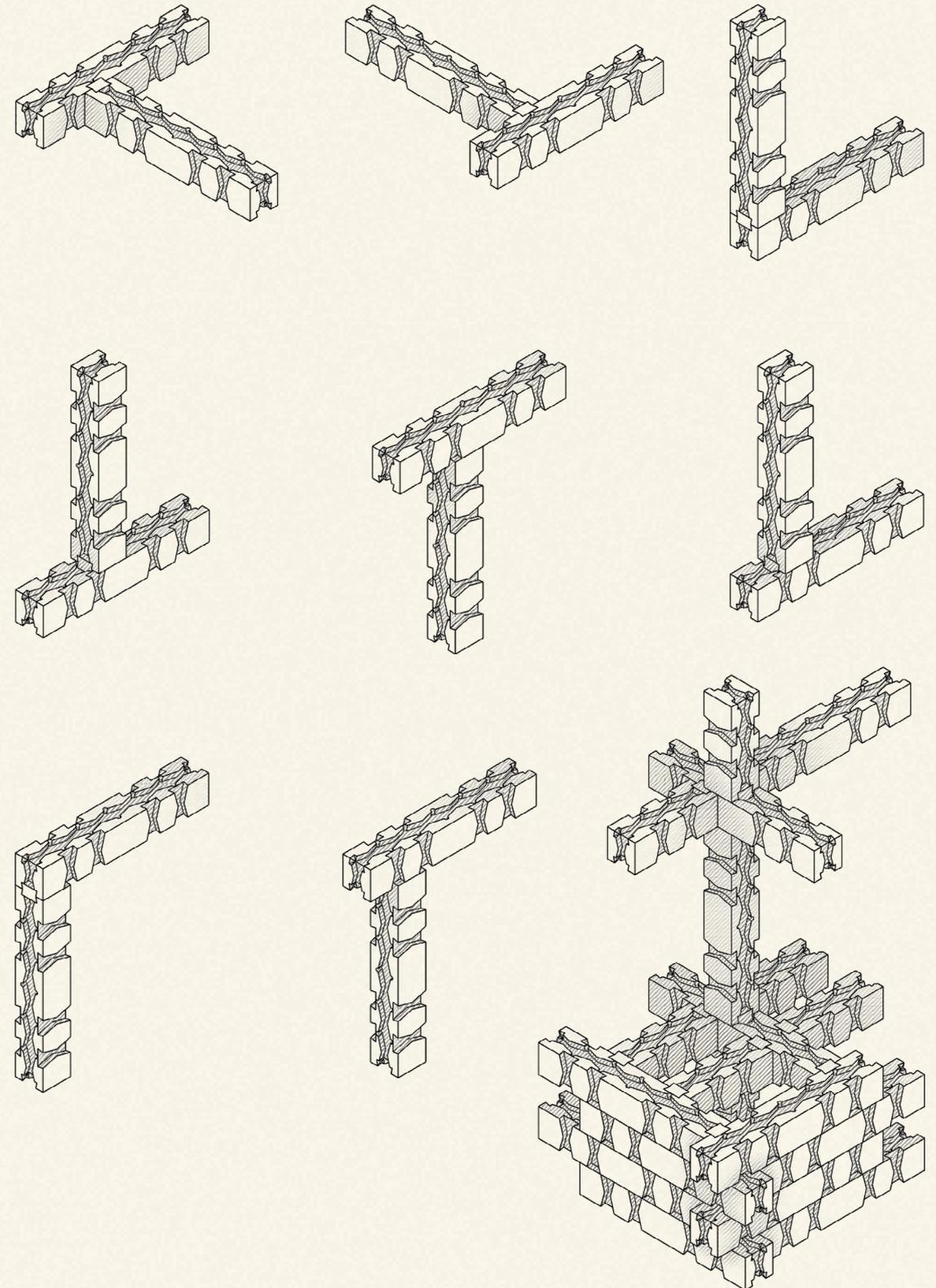


## Modifiche

- Aumento moduli a 6 unità
- Spostamento fresate laterali
- Aumento tipologie biscotti

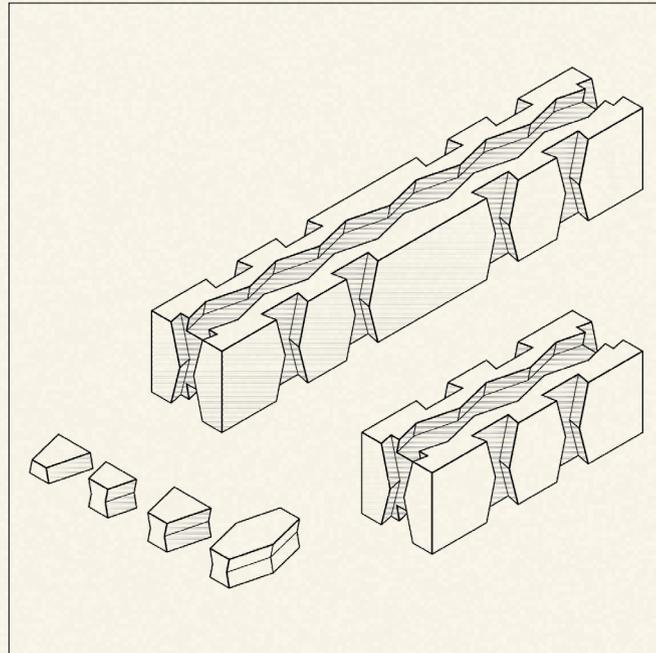
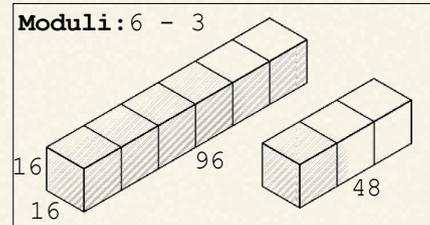
## Commenti

Errore nel posizionamento delle fresate laterali a clessidra nelle due estremità. Non permette la creazione di incastro angolare senza sporgenze. Nell'assonometria a lato non sono stati inseriti i biscotti esagonali per connessione layer causa errore progettatazione di sfalsamento. Incastro a tre vie sfalsato.

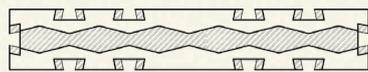


# LokAlp Mk VII

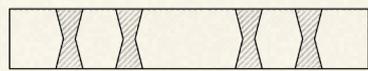
<b>Modello</b>	Mark VII
<b>Data</b>	12/08/2023
<b>Incastri</b>	44
<b>Scarto %</b>	22.58%
<b>Peso</b>	8.56kg



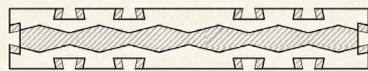
Superiore scala 1:20



Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

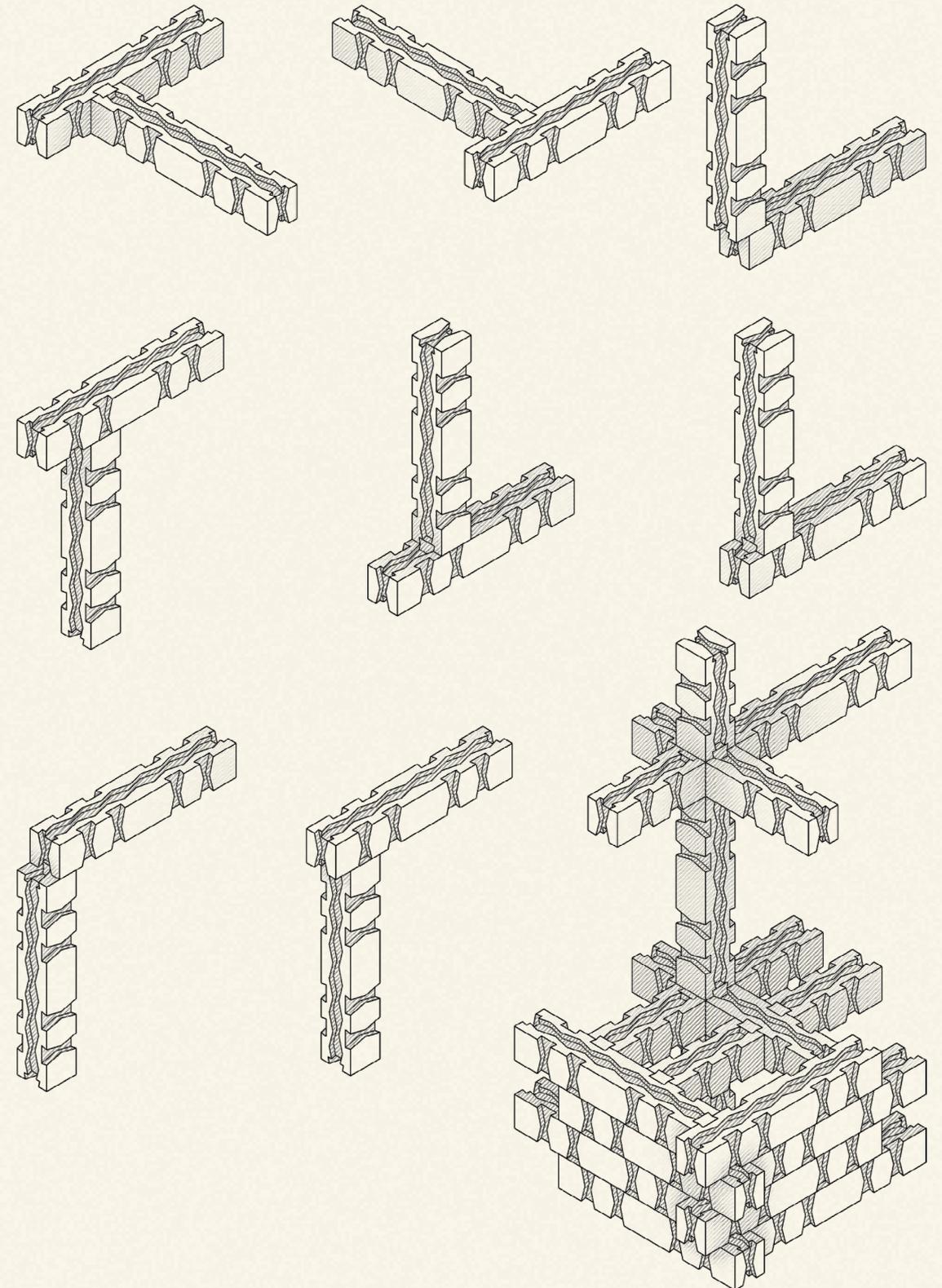


## Modifiche

- Rimozione alcune tipologie di biscotti
- Tipologia di fresata "continua" con angoli smussati
- Spostamento fresate superiori e inferiori

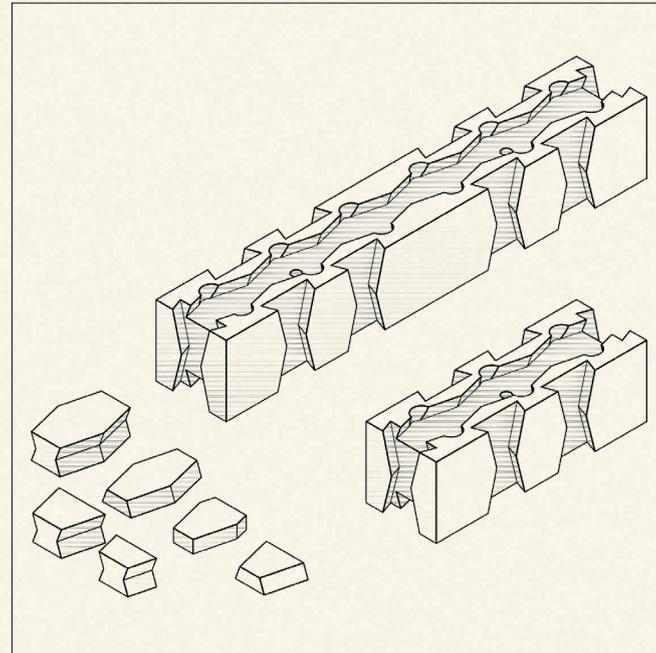
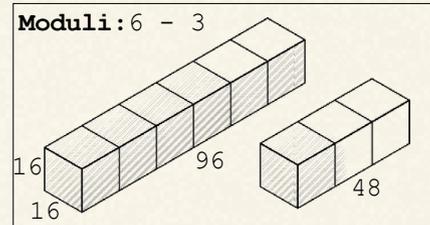
## Commenti

Stessa problematica del Mk VII - no possibilità di creare incastro angolare senza sporgenze causa errato posizionamento fresate laterali a clessidra alle due estremità + problema fresate superiori-inferiori sfalsate. Nodo a tre vie possibile. Potenziale problematica di produzione dei biscotti causa contenuto raggio di fresatura, pro design più pulito e rimosso punto debole tra fresatura a cerchio faccia superiore-inferiore e fresate laterali a clessidra.

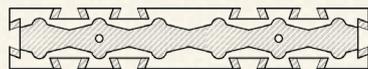


# LokAlp Mk VIII A

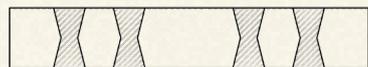
Modello	Mark VIII/A
Data	17/08/2023
Incastri	44
Scarto %	30.06%
Peso	7.73kg



Superiore scala 1:20



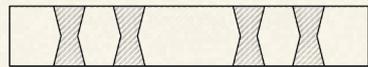
Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

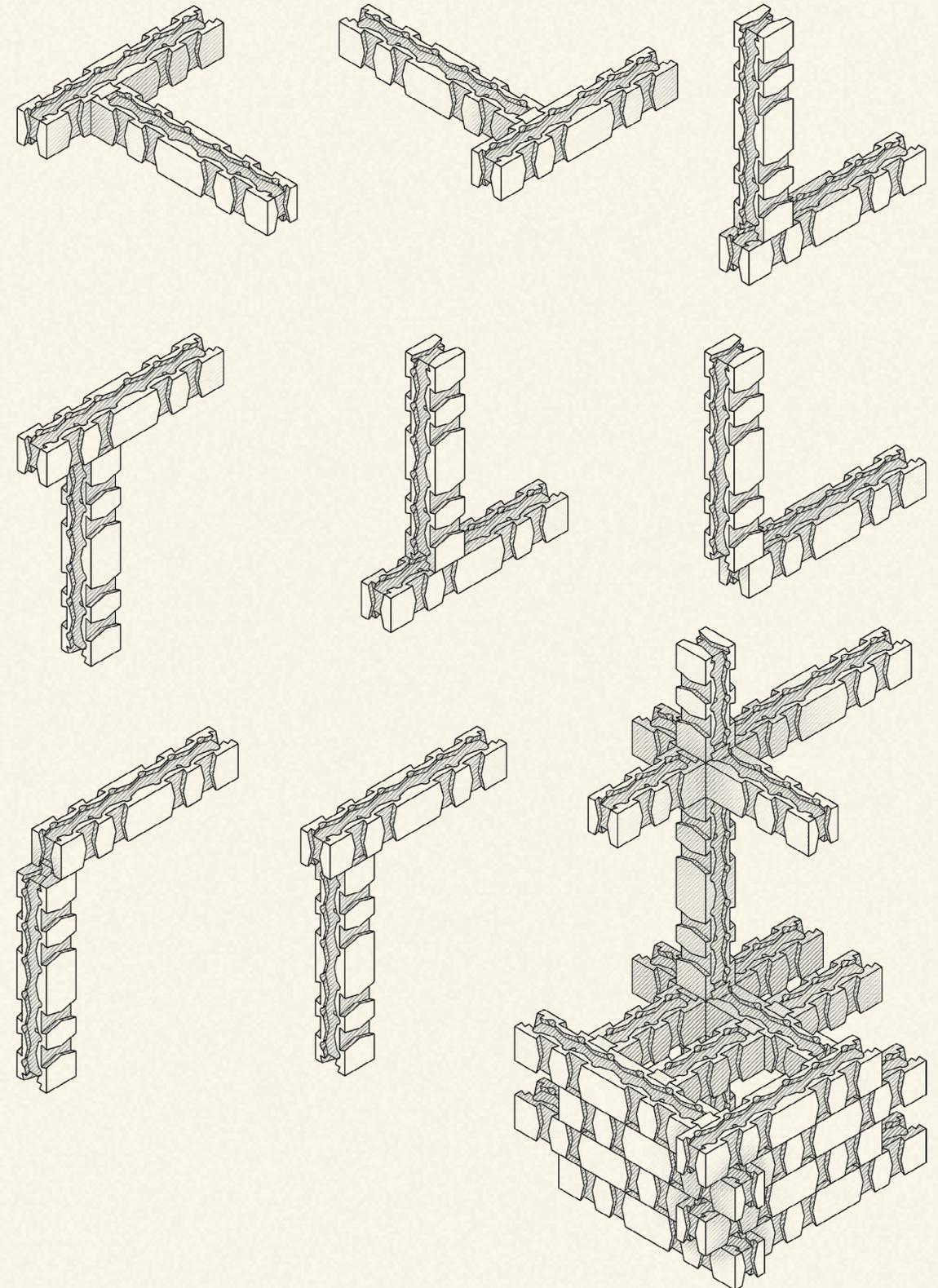


## Modifiche

- Riproposizione fresata superiore e inferiore con metodo "a cerchio"
- Aumento tipologia biscotti

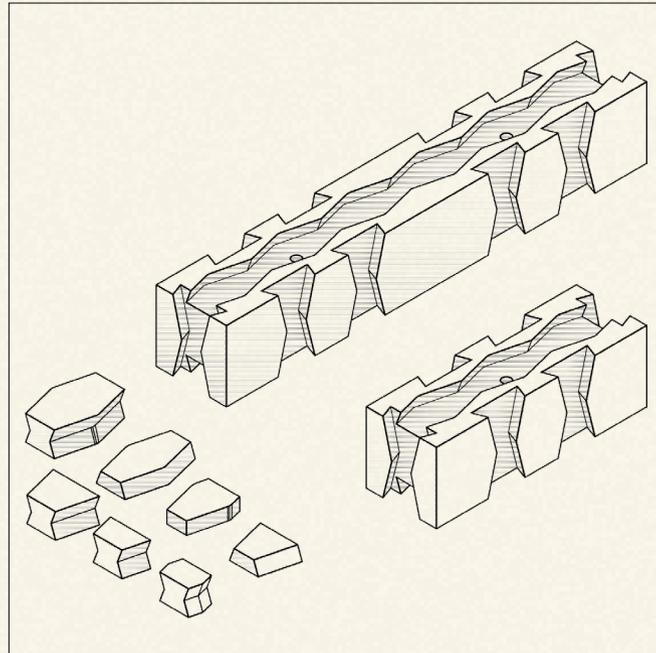
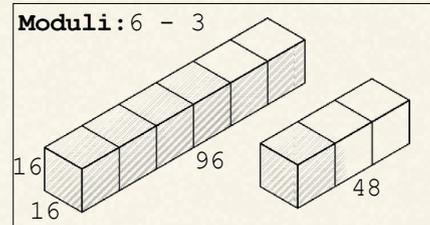
## Commenti

Stesse problematiche e vantaggi del Mk VII. Probabilmente semplificata la produzione dei biscotti causa angoli netti di questi ultimi.

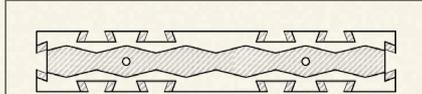


# LokAlp Mk VIII<sub>B</sub>

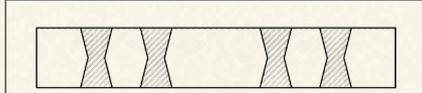
<b>Modello</b>	Mark VIII/B
<b>Data</b>	17/08/2023
<b>Incastri</b>	44
<b>Scarto %</b>	29.52%
<b>Peso</b>	7.79kg



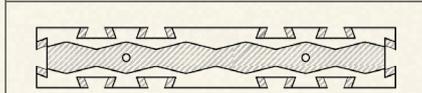
Superiore scala 1:20



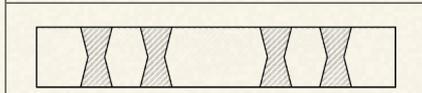
Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

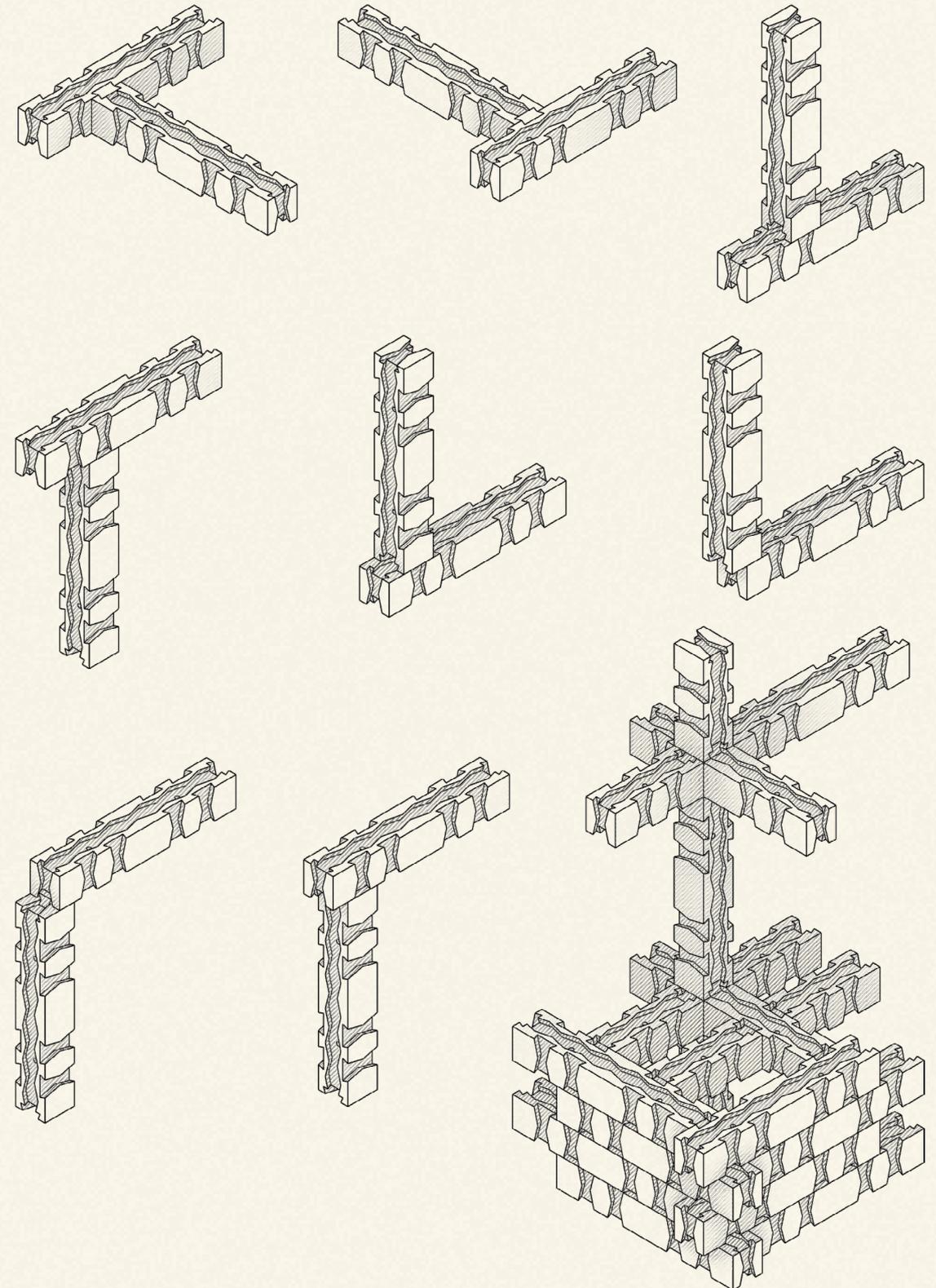


## Modifiche

- Riproposizione fresata superiore e inferiore con metodo "continuo" (angoli smussati)
- Aumento tipologia biscotti

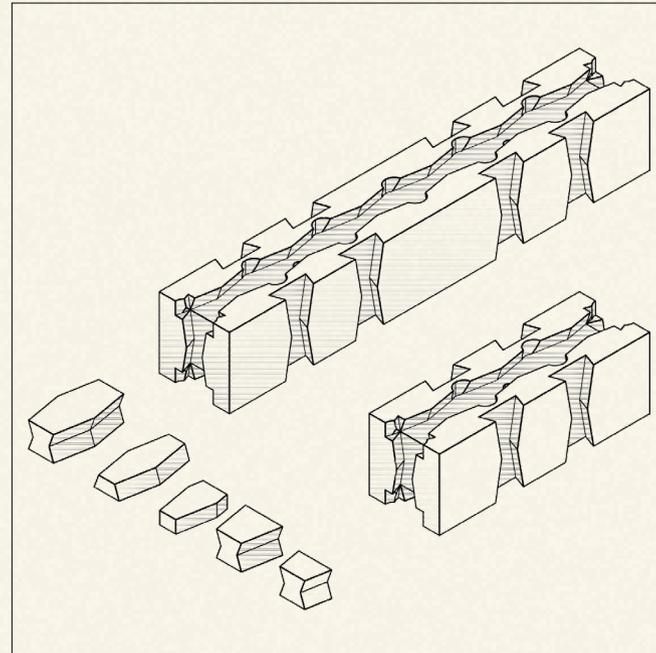
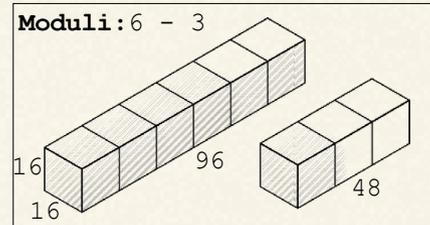
## Commenti

Stesse problematiche e vantaggi del Mk VIII/A. Probabile difficoltà di produzione di biscotti causa raggio stretto in angoli vivi. Di fatto una copia del Mk VII ma con un'apertura di coda di rondine maggiore.



# LokAlp Mk IX

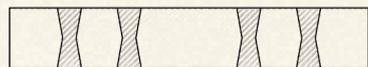
<b>Modello</b>	Mark IX
<b>Data</b>	05/09/2023
<b>Incastri</b>	44
<b>Scarto %</b>	24.16%
<b>Peso</b>	8.39kg



Superiore scala 1:20



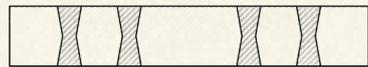
Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

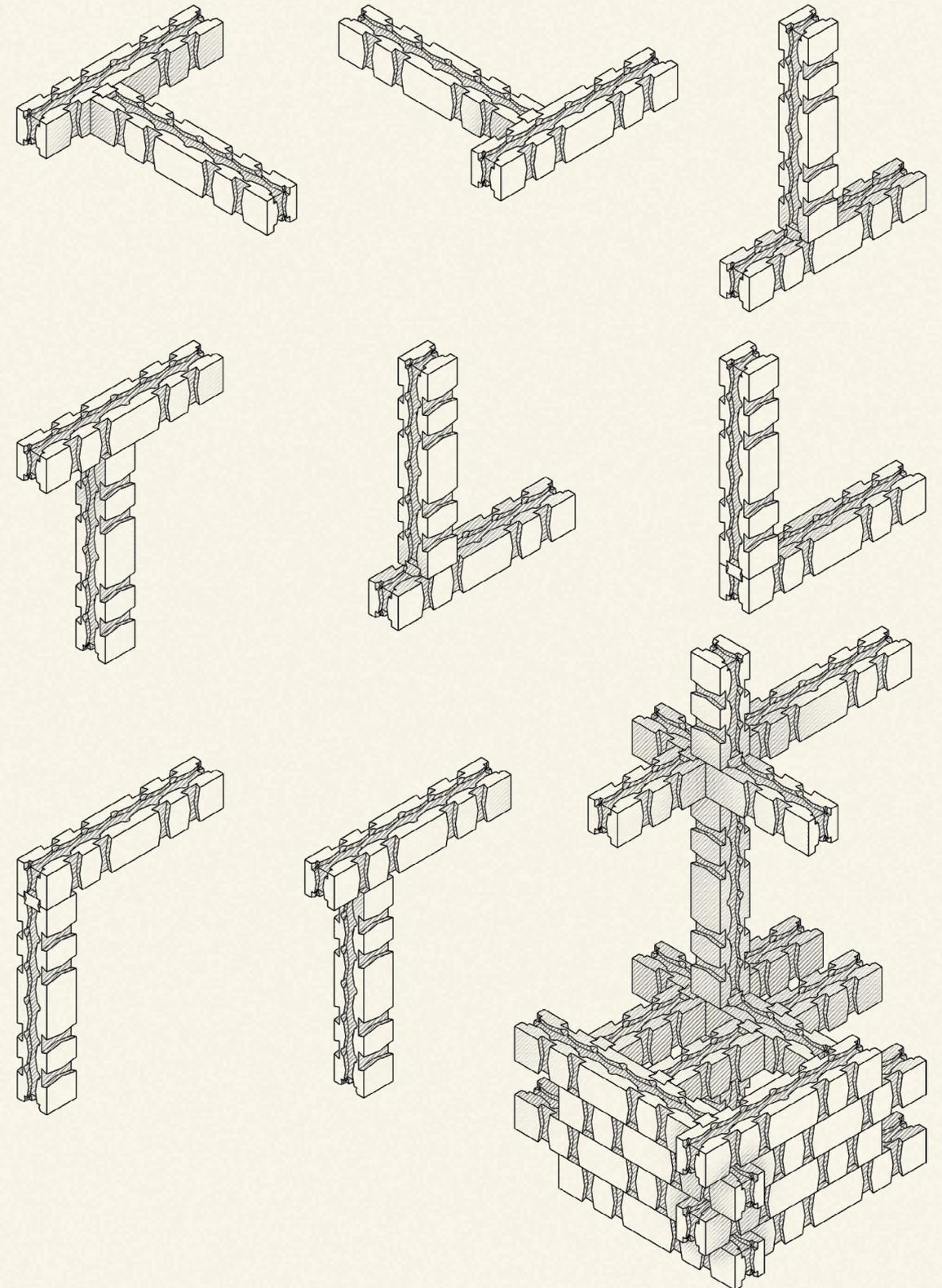


## Modifiche

- Ritorno a metodo fresata superiore e inferiore "a cerchio"
- Riduzione tipologia biscotti
- Spostamento fresate superiori e inferiori

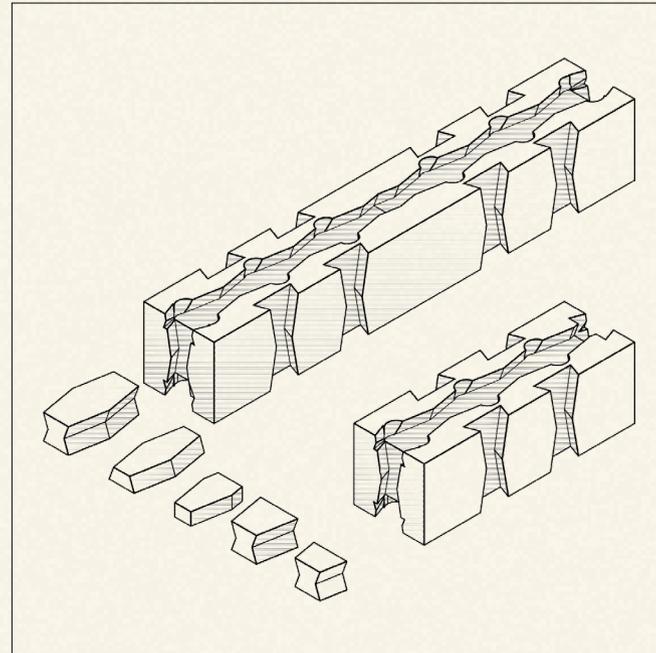
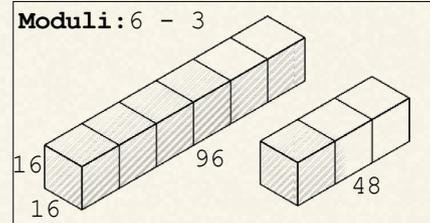
## Commenti

Stessa problematica del Mk VIII/A per quanto riguarda il nodo angolare non pulito e sfalsamento delle fresate superiori e inferiori. Nodo a tre vie sfalsato ma permette nodo a due vie a filo nelle due estremità del blocco.



# LokAlp Mk X

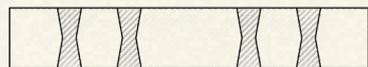
Modello	Mark X
Data	07/09/2023
Incastri	40
Scarto %	23.91%
Peso	8.42kg



Superiore scala 1:20



Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

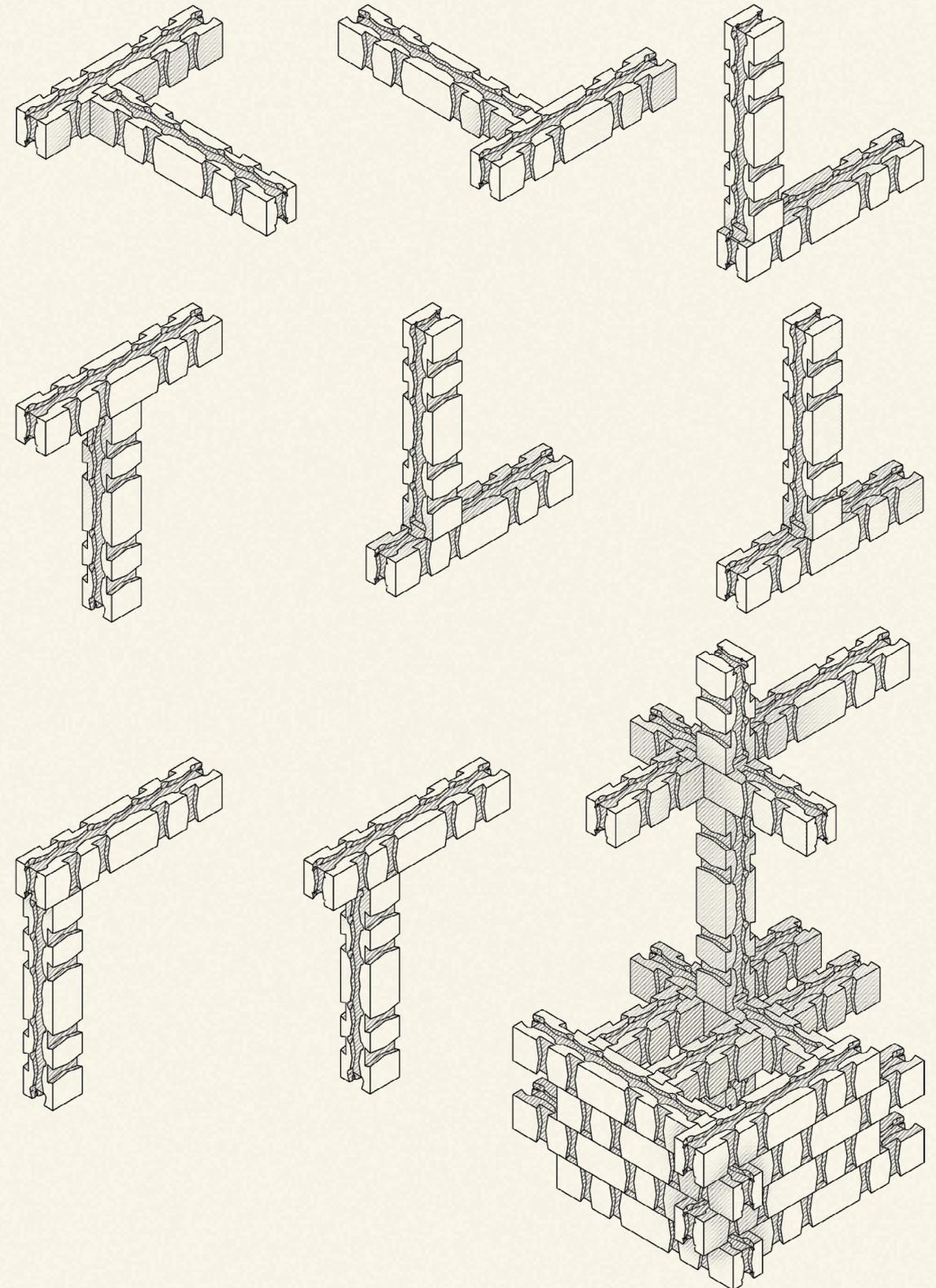


## Modifiche

- Spostamento di 1/4 rispetto al centro delle fresate superiori e inferiori

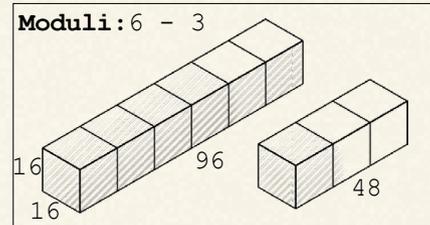
## Commenti

Stessa problematica del Mk VIII/A per quanto riguarda il nodo angolare non pulito e sfalsamento delle fresate superiori e inferiori. Falsamento di 1/4 nel nodo a tre vie. Potenziali problemi di aggregazione con lo shift di 1/4 delle fresate superiori e inferiori.

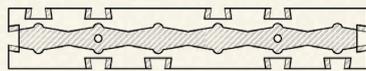


# LokAlp Mk XI

Modello	Mark XI
Data	07/09/2023
Incastri	44
Scarto %	21.83%
Peso	8.65kg



Superiore scala 1:20



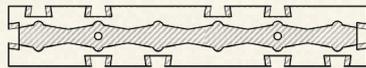
Laterale 1 scala 1:20



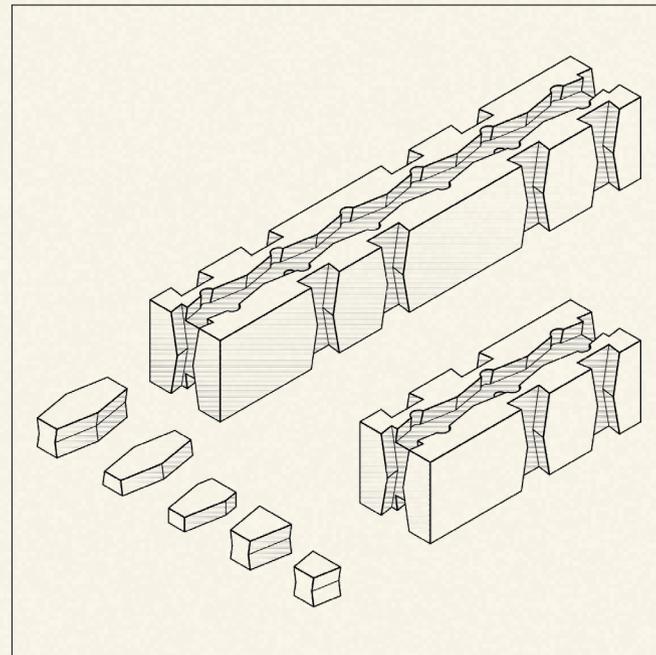
Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

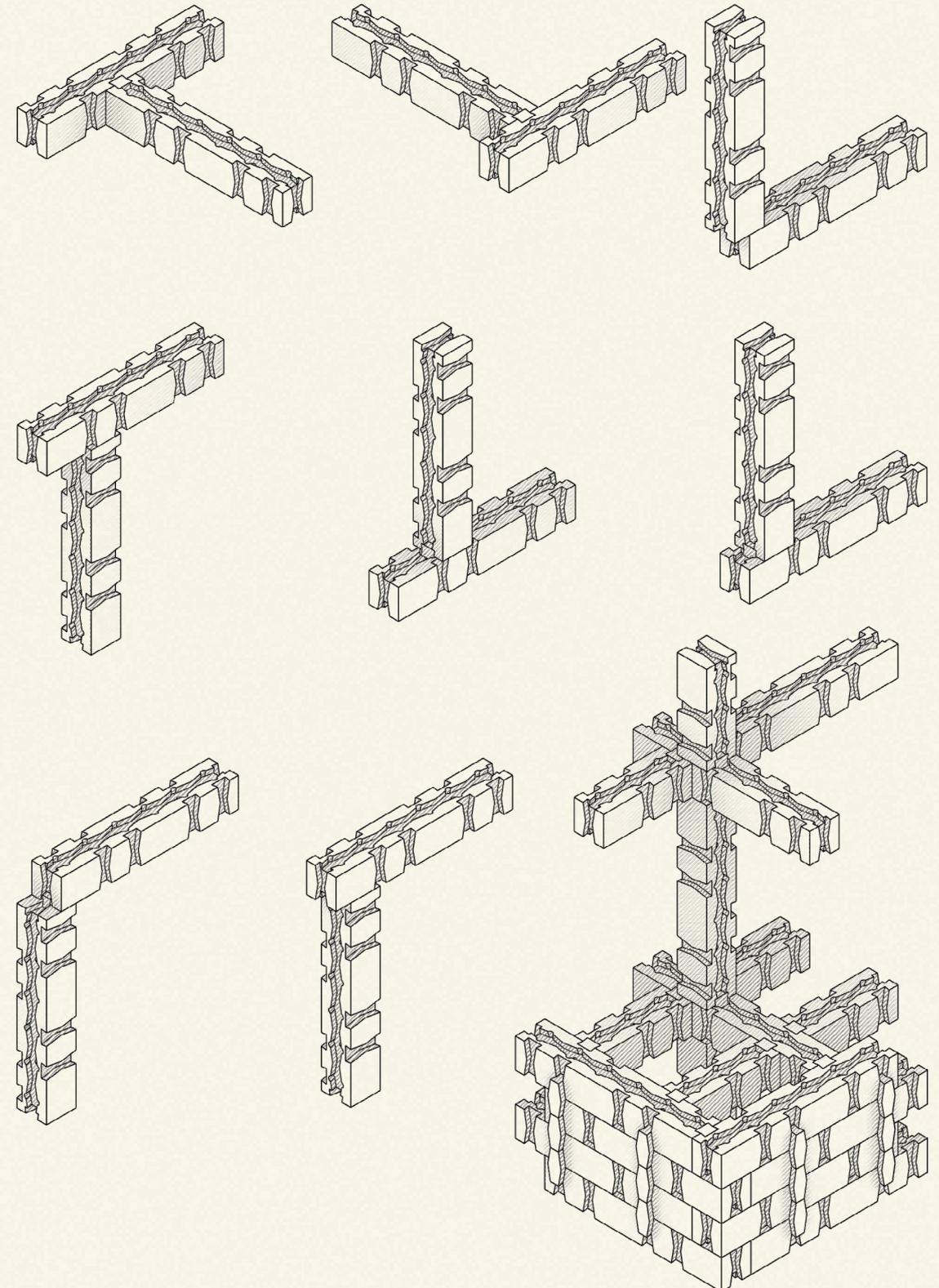


## Modifiche

- Disposizione differente fresate laterali
- Rimossa perfetta simmetria delle fresate laterali

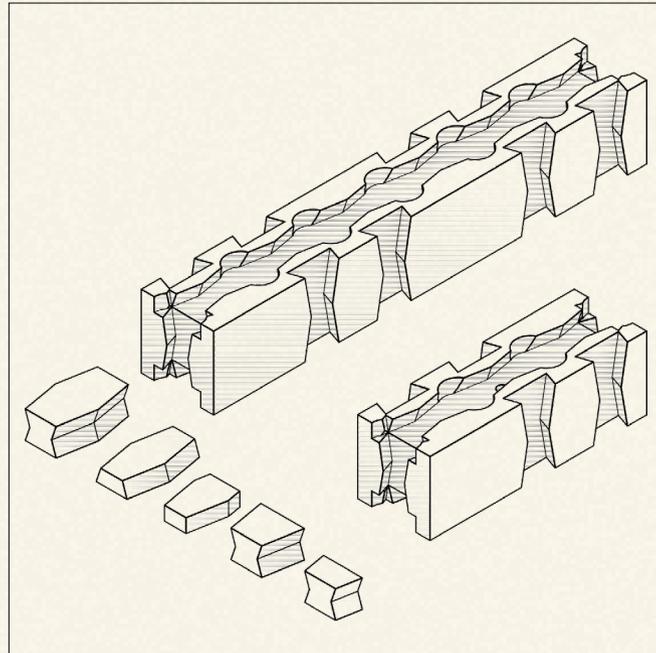
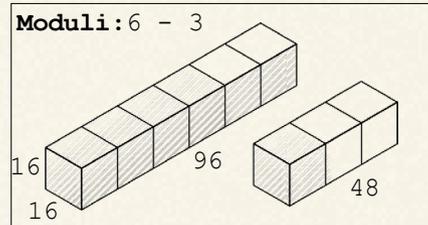
## Commenti

Risolto il problema del nodo angolare con sporgente presente dal Mk VI al Mk X. Nodo a tre vie sfalsato. Leggera limitazione compositiva dovuta alla non perfetta specularità del blocco. Possibilità utilizzo blocco esagonale per rinforzo connessione tra differenti layer di blocchi.



# LokAlp Mk XII

Modello	Mark XII
Data	13/09/2023
Incastri	44
Scarto %	30.85%
Peso	7.65kg



Superiore scala 1:20



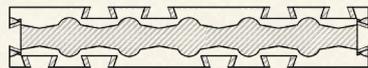
Laterale 1 scala 1:20



Laterale 2 scala 1:20



Inferiore scala 1:20



Fronte-Retro scala 1:20

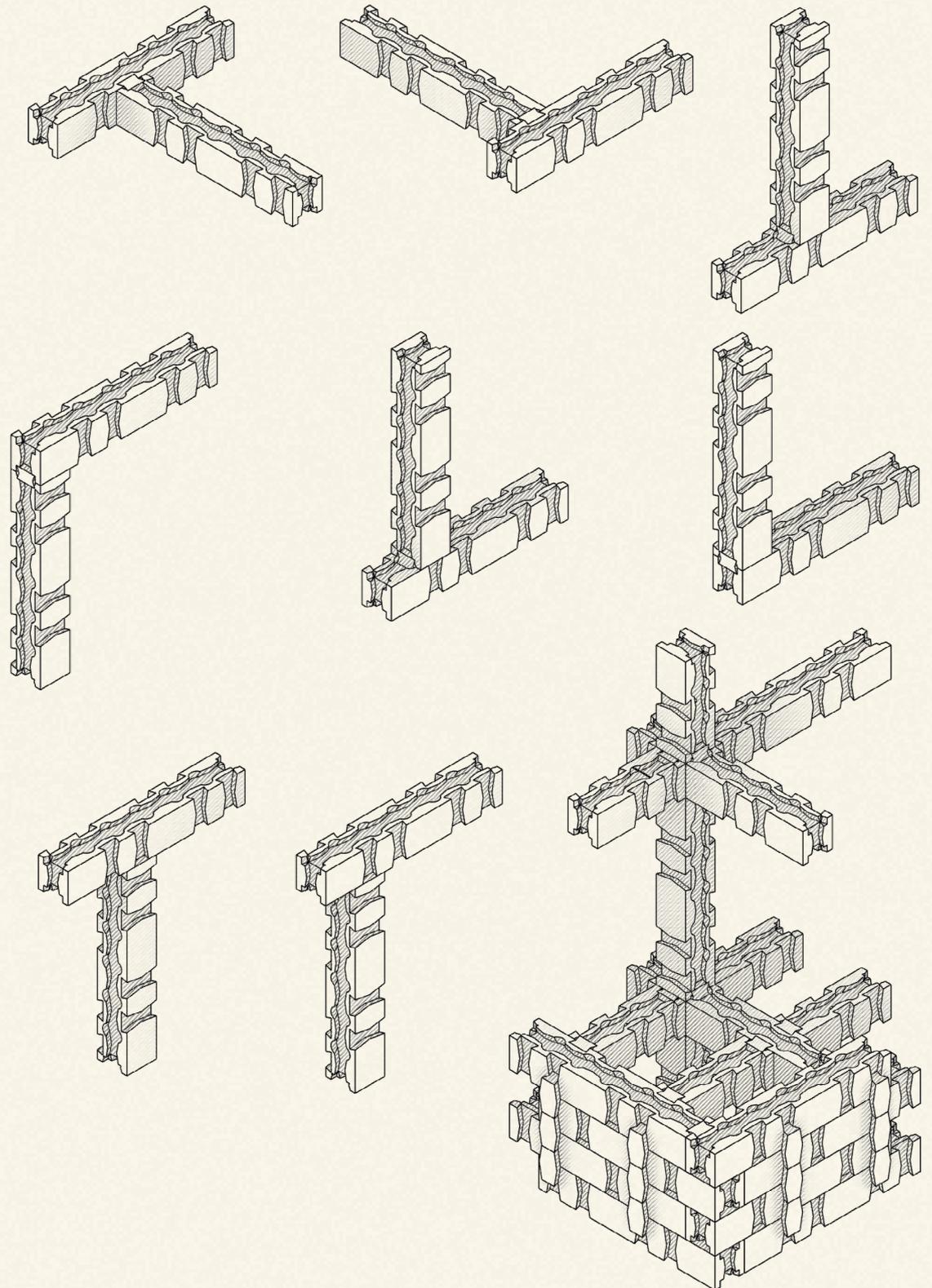


## Modifiche

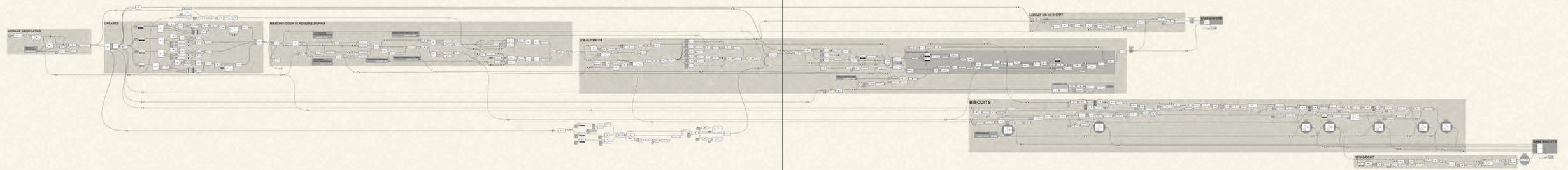
- Spostamento delle fresate superiori e inferiori
- Aumento dimensione punta di fresa a coda di rondine per la produzione

## Commenti

Risolto nodo a tre vie non sfalsato. Risolto possibile punto debole tra fresate superiori/inferiori e fresate laterali a clessidra. Medesimi vantaggi del Mk XI. Leggera limitazione compositiva dovuta alla non perfetta specularità del blocco. Dimensione punta di fresa ingegnerizzata per la produzione con mandrino da 20kW e fresa industriale a coda di rondine dimensioni raggio superiore-inferiore 45mm - 65mm.



Codice Generativo blocco LokAlp

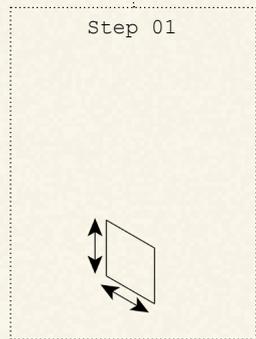
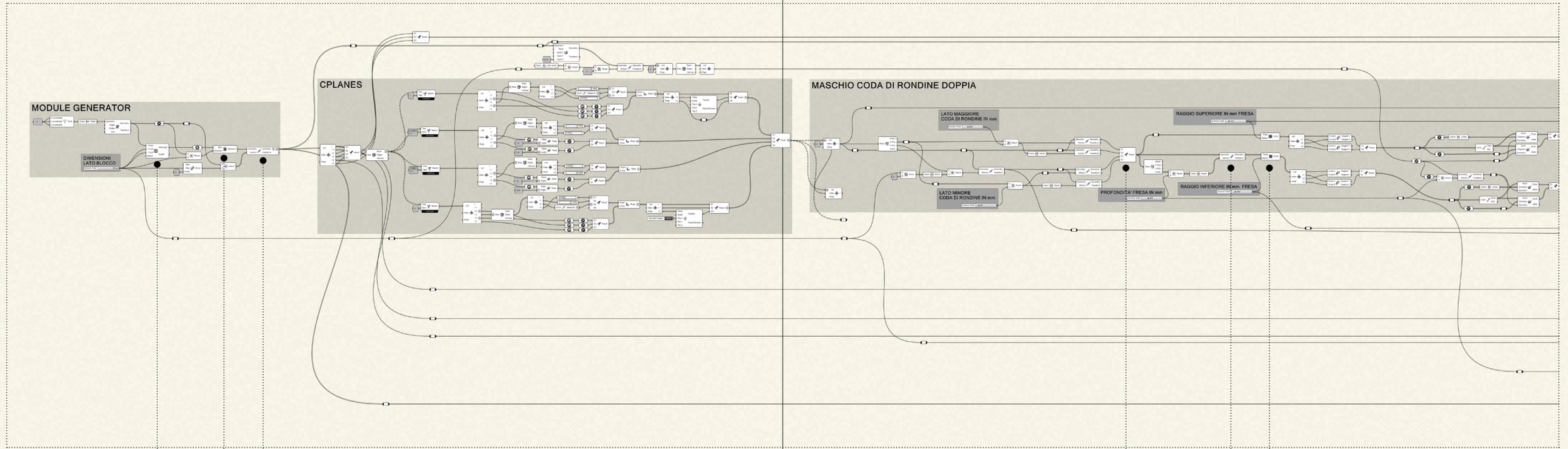


A partire dal blocco Mk V è stato implementato l'utilizzo della progettazione parametrica per una più dinamica implementazione delle modifiche. L'implementazione del computational design nella fase progettuale del blocco è stata essenziale soprattutto per una questione legata alla produzione: grazie alla possibilità di poter cambiare in tempo reale i parametri base della generazione del blocco, infatti, il wor-

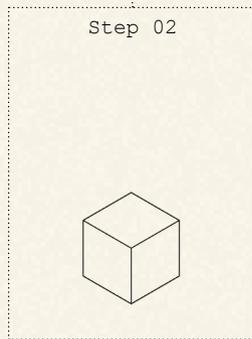
flow legato alla modellazione è stato reso estremamente dinamico e fluido basandosi sul concetto file-to-factory dalla modellazione 3D alla stampa 3D dei differenti test. Inoltre, oltre alla fase prototipale della produzione di modellini in scala 1:10, il computational design ha svolto un ruolo essenziale per il dialogo con l'azienda di carpenteria Legnotech: sino alla penultima versione del blocco, infatti, non

era ancora nota quale tipologia di punta di fresa a coda di rondine industriale sarebbe stata disponibile per la produzione. Questo non avrebbe comunque dei problemi, in quanto la modifica delle dimensioni della punta di fresa sarebbe stata immediata, oltre al fatto che si sarebbe potuta cambiare la tipologia di fresa in corso d'opera senza problematiche. Nelle successive pagine verrà esposta in step sem-

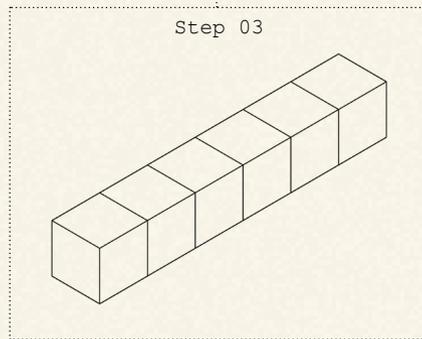
plificati la logica generativa del blocco LokAlp: il file presenta delle dimensioni contenute pari solamente a 206kB e non necessita di informazioni pregresse per la generazione del blocco; inoltre è stato scritto in maniera tale da essere facilmente modificato nei suoi parametri base anche da non addetti ai lavori per la generazione immediata di differenti varianti legate alle possibili problematiche di produzione.



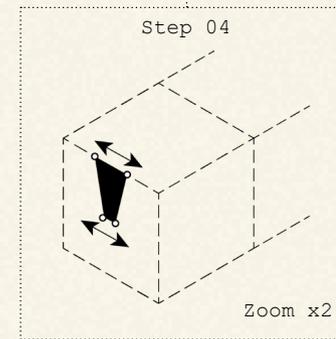
Dimensionamento dell'unità iniziale quadrata. Durante l'evoluzione del blocco si è passati da un minimo di 100mm ad un massimo di 160mm di lato (versione finale)



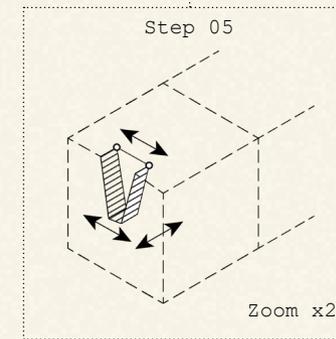
Generazione dell'unità iniziale cubica basata sul quadrato precedentemente generato.



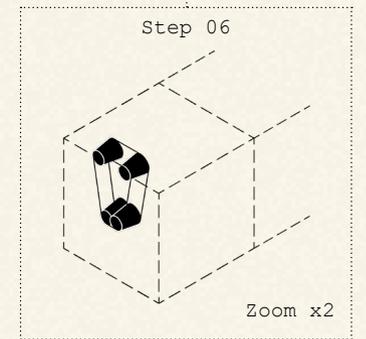
Generazione del quantitativo di moduli ipotizzati che descriveranno la lunghezza del blocco. Si è passati da 3 unità di lunghezza (Mk I) sino ad un massimo di 6 unità di lunghezza (Mk VI-XII).



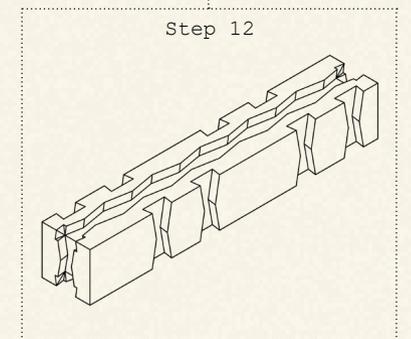
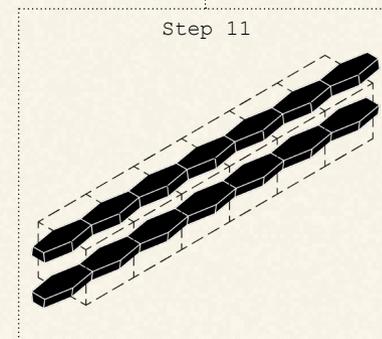
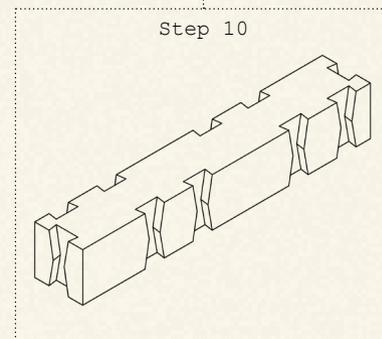
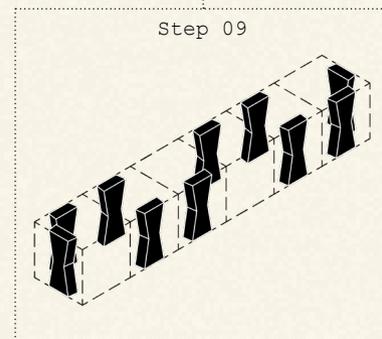
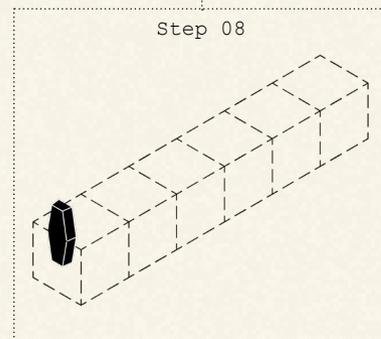
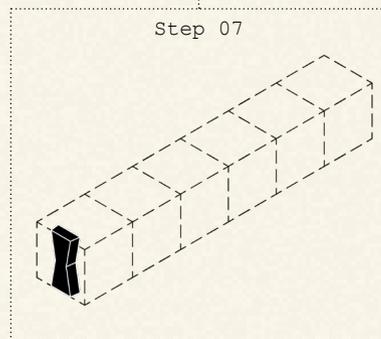
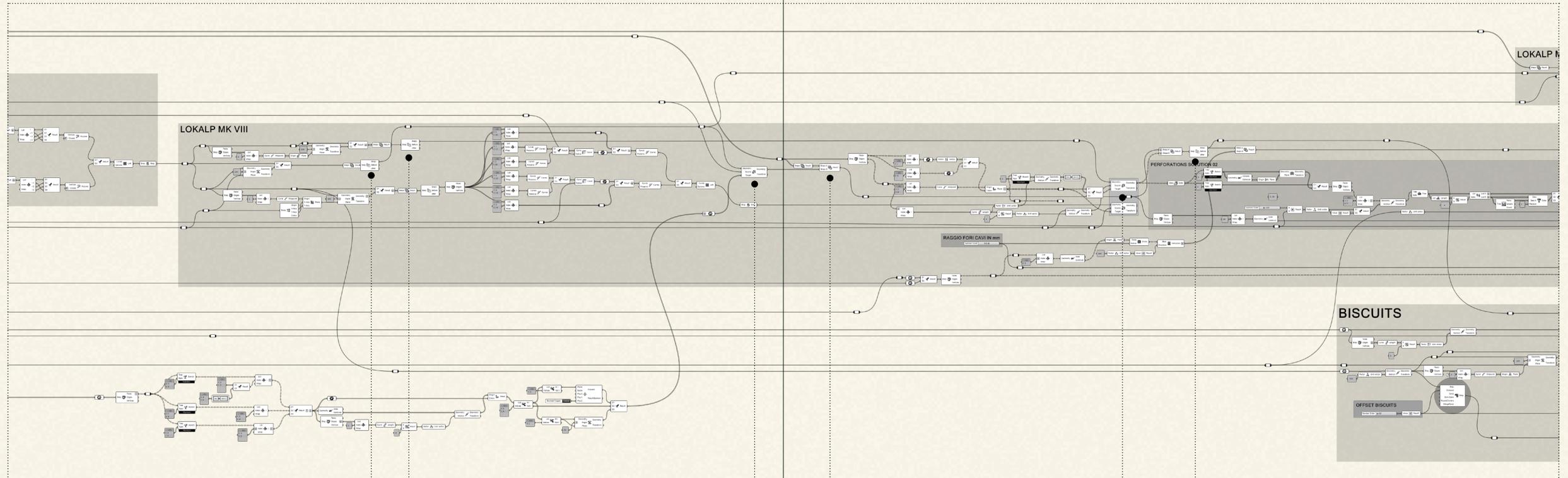
Definizione dei lati della coda di rondine esterni + diametro superiore fresa. La parametrizzazione di queste informazioni è essenziale per una immediata modifica rispetto ai diametri disponibili di frese.



Definizione dei lati della coda di rondine interni + diametro inferiore fresa. La parametrizzazione di queste informazioni è essenziale per una immediata modifica rispetto ai diametri disponibili di frese.



Generazione delle punte di frese parametrizzate ai quattro angoli della fresata trapezioidale. Il volume finale sarà utilizzato come base per la generazione delle geometrie sottrattive rispetto al blocco pieno.



Generazione della fresata "a clessidra". La generazione è stata effettuata specchiando il modulo di base trapezoidale rispetto al lato orizzontale corto.

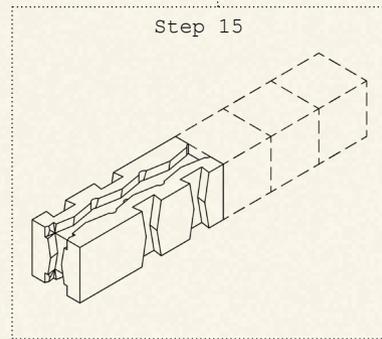
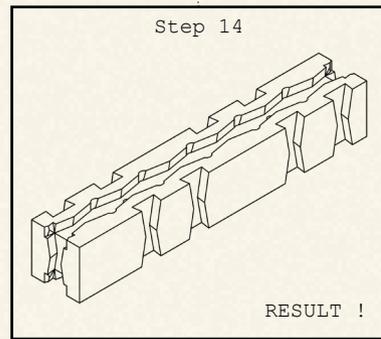
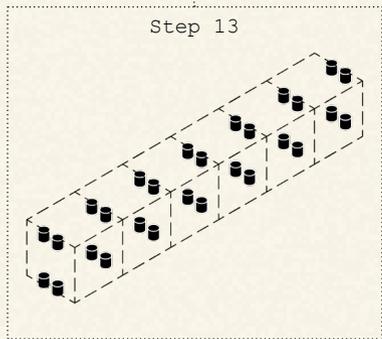
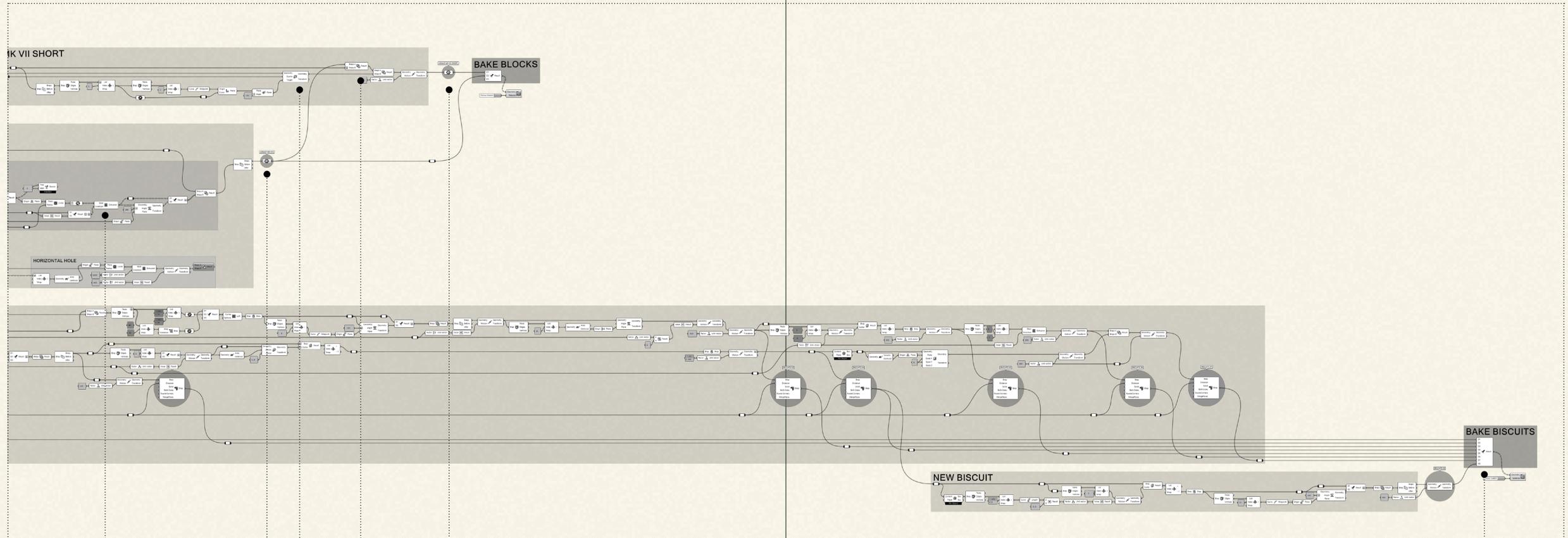
Generazione della fresata "esagonale". La generazione è stata effettuata specchiando il modulo di base trapezoidale rispetto al lato orizzontale lungo.

Posizionamento della fresata "a clessidra" nelle facce dei moduli interessate. Le facce interessate sono spesso cambiate nell'evoluzione del blocco, e dal Mk XI esse non sono state più perfettamente simmetriche.

Sottrazione booleana dei volumi delle fresate "a clessidra" per la generazione dei primi intagli laterali svolti dalla fresa a coda di rondine.

Posizionamento della fresata "esagonale" nella faccia superiore e inferiore del blocco. Tale intaglio, comparso con il Mk IV, ha spesso cambiato posizionamento durante l'evoluzione "slittando" di mezzo blocco o un quarto di blocco.

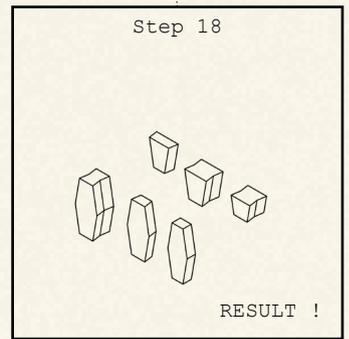
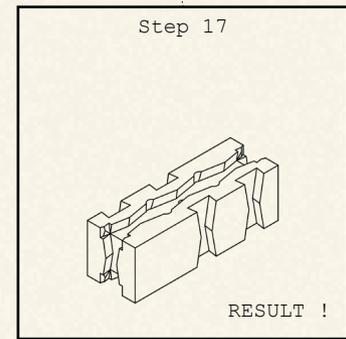
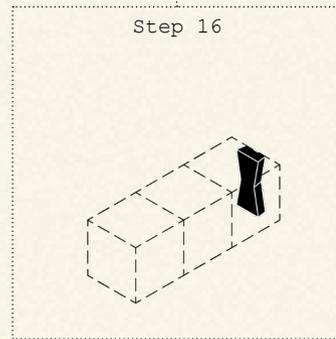
Sottrazione booleana dei volumi delle fresate "esagonali" per la generazione degli intagli superiori e inferiori svolti dalla fresa a coda di rondine.



Generazione della fresata "cilindriche" lungo i vertici esterni degli esagoni. Necessari per un corretto inserimento di alcuni biscotti.

Sottrazione booleana dei volumi delle fresate "cilindriche" per la generazione finale del blocco LokAlp.

Sottrazione booleana di metà della lunghezza del blocco per la generazione del blocco LokAlp "Short".



Generazione della fresata "a clessidra" nel nuovo lato del blocco LokAlp "Short".

Sottrazione booleana del volume della fresata "a clessidra" per la generazione finale del blocco LokAlp "Short".

Generazione dei sei biscotti LokAlp per la connessione dei differenti blocchi.

## 5.2.2 Produzione

La parte di produzione del blocco LokAlp è stata svolta grazie alla collaborazione del partner Legnotech, azienda attiva dal 2001 nel settore della carpenteria lignea. Il confronto diretto con la parte produttiva è stato essenziale per efficientare il dialogo legato alle correzioni tecniche da svolgere nel prodotto LokAlp: grazie al computational design, infatti, l'immediata modifica dei dati di input nella generazione del blocco ha permesso di gestire efficacemente le richieste da parte della produzione per una corretta modellazione "su misura" che permettesse di utilizzare efficacemente le macchine industriali disponibili.

Nello specifico, Legnotech ha dedicato per la produzione dei 137 blocchi una Hundegger K2i: questa tipologia di centro di taglio permette di svolgere tutte le operazioni di taglio di carpenteria lignea per la produzione di componenti architettonici, potendo sfruttare al suo interno tutta una

serie di dispositivi quali seghe circolari e orizzontali sino a 13kW, e fresa universale a 5 assi con mandrino industriale da 35kW. Questa tipologia di centri di taglio, con un prezzo di circa 400.000 euro, è studiata appositamente per la produzione in serie di componenti architettonici lignei in maniera continuativa su tre turni lavorativi, con il vantaggio di poter gestire elementi anche di grandi dimensioni nell'ordine della decina di metri di lunghezza.

Come accennato nel capitolo 5.2, la volontà iniziale era quella di utilizzare gli scarti di pannelli CLT prodotti nella caratteristica della carpenteria lignea per il taglio di aperture quali porte e finestre: Se è pur vero che nel mondo delle costruzioni in legno lo spessore tipico di pannelli di CLT si aggira intorno ai 150mm, è comunque doveroso sottolineare il fatto che poche aziende - in particolare in territorio italiano - presentano un quantitativo tale

di cantieri aperti simultaneamente tale da poter produrre un grande quantitativo di scarti di pannelli CLT. Per tale motivo si è optato per l'utilizzo di travi di legno lamellare di abete bianco quadrate da 160mm di lato, per un peso specifico di circa 450kg/m<sup>3</sup>. L'utilizzo di nuovo materiale "verGINE" per la produzione dei blocchi ha dunque minato uno dei tre pilastri del Blocco LokAlp, ossia quello del riciclo: ciononostante, da un punto di vista tecnico di produzione questo mancato obiettivo non avrebbe comunque influenzato le lavorazioni dei centri di taglio, in quanto il prodotto iniziale avrebbe comunque presentato le medesime dimensioni.

La produzione dei blocchi LokAlp è stata un interessante test di prova per questa tipologia di macchinari, per i quali è stato possibile comprendere i vari vantaggi e punti deboli: innanzitutto vi è da sottolineare il fatto che le Hundegger presentano una limitata serie di operazioni "pre-settate" che possono essere svolte con la macchina, chiamate macro: una macro tipica, utilizzata anche con il blocco LokAlp, è quella dedicata alla produzione di un intaglio a coda di rondine. Le macro permettono la gestione di moltissimi parametri, come profondità di taglio, ampiezza e differenti angolazioni. Al tempo stesso, però, non permettono l'intaglio seguen-

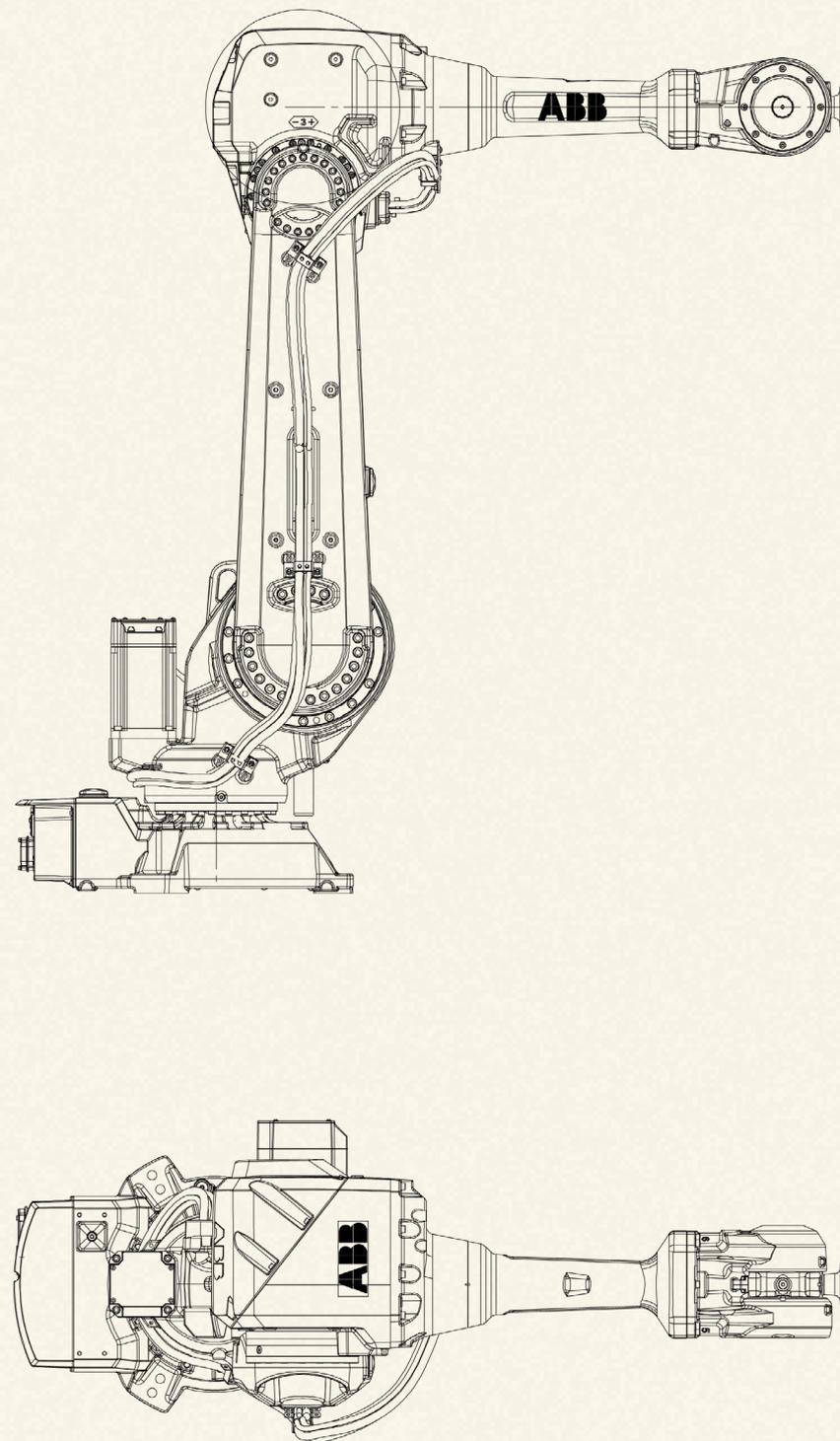
do percorsi personalizzati - come per esempio una fresata a forma esagonale - per tale motivo dunque è necessario trovare una combinazione di differenti macro che permetta di raggiungere il risultato più simile a quello desiderato. Inoltre, questa tipologia di centri di taglio presenta un quantitativo massimo di macro per ogni unità, nello specifico di questo modello pari a 120: questa limitazione nella memoria ha portato a dover "segmentare" in successivi passaggi la lavorazione del blocco, aumentando dunque i tempi di produzione in quanto ogni volta era necessario riposizionare manualmente il blocco per un nuovo set di fresature. Infine, come sottolineato precedentemente, queste macchine sono progettate per la produzione di componenti architettonici con una luce potenziale anche di 12 metri: sono dunque funzionali alla movimentazione di volumetrie di un ordine di grandezza maggiore rispetto al blocco LokAlp, che al contrario presenta una scala a metà tra quella architettonica e quella della falegnameria. Questa mancata "corrispondenza" nella scala ha portato - oltre che alla movimentazione manuale da parte degli operatori durante le fasi di intaglio - ad una riduzione della precisione in alcune tipologie di taglio di circa 2-5 mm, non compromettendo comunque particolarmente la tenuta meccanica del sistema costruttivo.

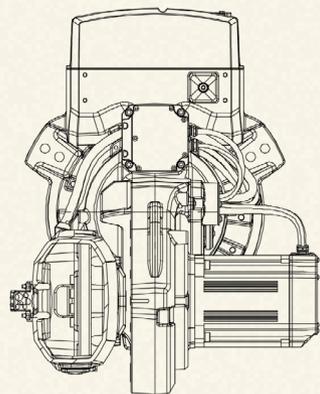
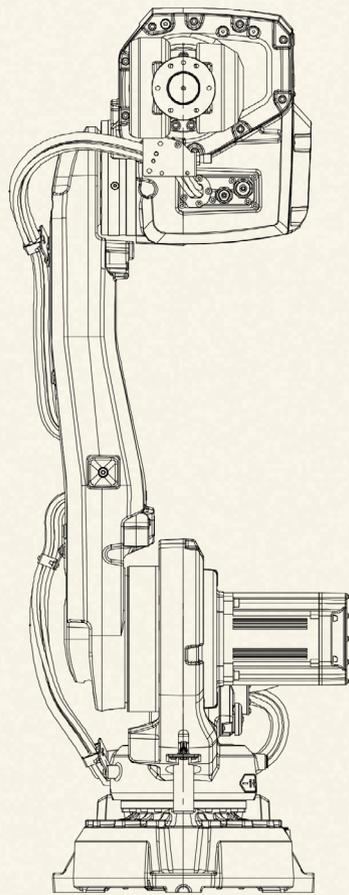
Il costo orario di una Hundegger è pari circa a 200 euro, ed è stato calcolato che per la produzione di un singolo blocco fossero necessari circa 40 minuti - tenendo anche conto di eventuali surriscaldamenti e dunque l'attesa di 20 minuti prima di poter utilizzare nuovamente la Hundegger - dunque per un costo per unità di circa 130 euro. Visto l'elevato costo di produzione si è concordato con la semplificazione della produzione di una parte dei 137 blocchi necessari, andando a rimuovere le fresate superiori ed inferiori ed arrivando ad un tempo di produzione di solamente 10 minuti, pari dunque a circa 30 euro.

In parallelo, si è svolto lo studio della possibilità di svolgere la produzione non con i tradizionali macchinari sopra citati - quali le Hundegger - ma tramite l'utilizzo di bracci robotici. I centri di taglio tradizionali, infatti, presentano una serie di limitazioni che possono essere superate dall'utilizzo efficiente della robotica. Innanzitutto, vi è da sottolineare il prezzo: per un modello Hundegger K2, lo standard dell'industria, parte da un prezzo di mercato di base di circa 400.000 euro. Per quanto riguarda un braccio robotico a 6 assi come l'ABB 7600 - che corrisponde in termini di payload e raggio d'azione alla fascia alta del settore - i prezzi di mercato sono indicativamente di 60.000-70.000 euro. Da

un punto di vista delle dimensioni, inoltre, i bracci robotici richiedono solitamente celle di lavoro mediamente contenute, ma il loro vantaggio è soprattutto dato dalla loro versatilità: i centri di taglio Hundegger - o anche i competitor italiani Essetre - hanno la principale limitazione di lavorare per macro difficilmente personalizzabili. Nello specifico, esistono dei preset di operazioni che possono essere svolte - come, per esempio, intaglio femmina a coda di rondine o fresatura di angoli vivi - che sono tipicamente la maggior parte delle quotidiane operazioni necessarie per la produzione di componenti architettonici tradizionali quali travi, pilastri o pannellature. In queste macro è possibile cambiare chiaramente tutta una serie di parametri per personalizzare l'operazione da svolgere, come la profondità di fresatura, apertura dell'alloggiamento trave o altezza dell'incastro; al tempo stesso, però, non è possibile sviluppare nuove macro da far svolgere alla macchina. O meglio, in linea teorica è possibile andando a contattare l'azienda produttrice della macchina, ma oltre ai tempi di attesa richiesti per la scrittura dei codici della nuova macro richiesta - che si traducono in termini temporali di anche due o tre mesi - vi è anche l'incertezza che la casa madre possa approvare questa tipologia di modifica software alla macchina, chiaramente per tutelarsi da un

Robot ABB IRB 4600, disegni tecnici. (Fonte: ABB Group)





Robot ABB IRB  
4600, disegni tecnici.  
(Fonte: ABB Group)

punto di vista legale e più in generale per non assumersi il rischio di sviluppare nuove macro personalizzate non progettate e testate per la tipologia di macchina fabbricata. I robot industriali, al contrario, sono sviluppati esattamente per questo: il loro successo è basato proprio sulla loro possibilità di poter essere facilmente riprogrammati per svolgere complesse operazioni di movimentazione, il tutto senza necessitare di una complessa ed approfondita conoscenza informatica. I robot industriali - che possono essere composti da tre o più assi di rotazione - presentano il principale vantaggio di poter efficientare sensibilmente complesse operazioni industriali, potendo svolgere compiti multiscopo - come pick-and-place, foratura, taglio o fresatura - senza necessità di essere supervisionati da operatori umani e potendo lavorare in maniera continua. I costi iniziali dell'acquisto del robot possono venire velocemente ammortizzati nelle tempistiche di produzione di massa industriali, e di fatto il loro unico costo aggiuntivo che andrebbe a incidere sul costo del prodotto farebbe riferimento al costo elettrico delle lavorazioni, oltre che al costo della programmazione delle operazioni del robot, che comunque presenta una incidenza minima.

Avendo compreso le principali limitazioni dal punto di vi-

sta produttivo delle Hundegger, le quali hanno evidenziato alcune problematiche nella movimentazione di componenti di ridotte dimensioni quali i blocchi LokAlp - oltre ad aver dimostrato alcuni processi di taglio parzialmente inefficienti - si è deciso di provare a efficientare il sistema di produzione tramite l'utilizzo di un braccio robotico a 6 assi. La scelta è ricaduta sull'utilizzo del robot ABB 4600, con una capacità di payload pari a 20kg e un raggio d'azione di 2.5 metri. Tramite l'utilizzo di Grasshopper si è potuto scrivere il codice di movimentazione del robot, il quale avrebbe dovuto svolgere operazioni di pick-and-place e fresature lungo tutte le sei facce del blocco.

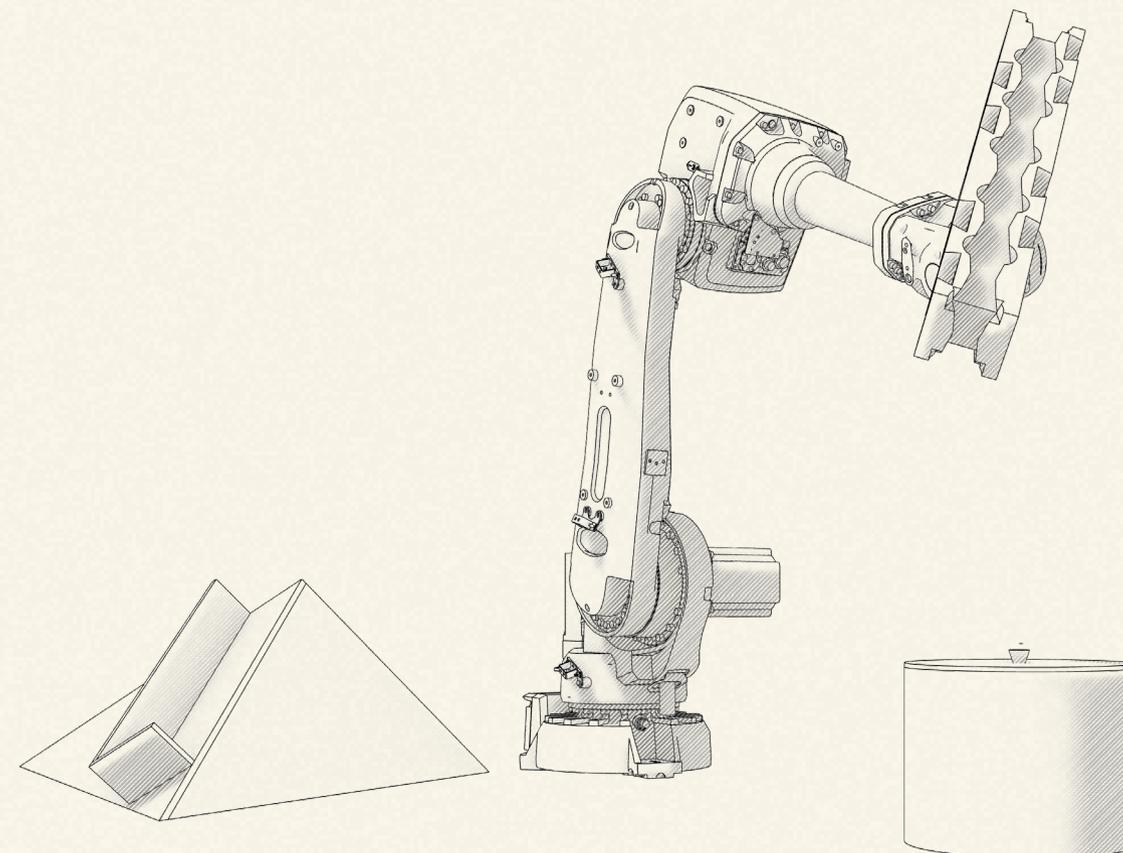
In termini più specifici, la cella operativa del robot avrebbe posseduto al suo interno un piano di centramento - ossia un piano inclinato su tre assi su cui appoggiare il blocco da fresare - il robot ABB e un piano di taglio che avrebbe ospitato un banco di fresa con la punta a coda di rondine. Il piano di centramento è un elemento essenziale per una corretta calibrazione della presa del blocco da parte del robot: tale piano inclinato, infatti, ha lo scopo di far scorrere nel suo angolo inferiore il blocco da fresare; avendo certe le coordinate del piano di centramento rispetto alle coordinate del robot, si potrà ave-

re la certezza che, quando il braccio robotico afferrerà il blocco dal piano di centramento, esso avrà afferrato l'elemento secondo le coordinate note prestabilite. Successivamente, il robot si muoverà verso il piano di taglio, eseguendo la traiettoria minima più efficiente – descritta tramite codice di Grashopper – per la fresatura di una delle sei facce. Terminata questa operazione, il robot allontanerà il blocco dal piano di taglio per andare a posarlo nuovamente presso il piano di centramento e ruotandolo di 90 gradi: in tale maniera si potrà svolgere il nuovo percorso di taglio nella seconda faccia del blocco. Questa operazione verrà eseguita per ulteriori 4 volte, potendo dunque svolgere la fresatura di tutte e sei le facce senza interruzioni di produzione e senza necessità dell'intervento di un operatore umano. La comparazione rispetto al sistema produttivo Hundegger ha portato a dei risultati particolarmente interessanti: innanzitutto, il tempo di produzione è passato dall'essere di circa 50 minuti a soli 22 minuti grazie all'utilizzo del braccio robotico. Il dimezzamento dei tempi di produzione è un risultato estremamente considerevole, soprattutto se tenendo conto del costo orario di utilizzo della Hundegger di circa 200 euro.

La produzione tramite robot industriale, comunque, non è stata purtroppo attuata per due

problematiche principali, ossia quella legata alle tempistiche di progettazione - che avrebbero necessitato tempo aggiuntivo per quanto riguarda la progettazione dell'end effector e del suo sistema elettronico di apertura/chiusura - e la mancanza di un mandrino industriale per la fresatura. I mandrini utilizzati nella Hundegger, infatti, sono macchinari industriali con una potenza di 35kW, non accessibili per l'acquisto a clienti privati e comunque con prezzi di accesso relativamente alti, nell'ordine circa della decina di migliaia di euro. L'unico mandrino disponibile in laboratorio sarebbe stato quello della fresatrice a batteria da 0,5 kW di potenza, dunque assolutamente non paragonabile alla sua controparte industriale. La dimostrazione della produzione robotica, dunque, non è potuta essere attuata, ma i risultati ottenuti lato simulazione software fanno intendere che in termini di tempi e costi una futura ricerca nell'ambito della robotizzazione dei processi produttivi nel settore legno potrebbe possa portare ad ottimi risultati.

*Vista prospettica della cella di lavorazione per la produzione del blocco LokAlp. Sulla sinistra è presente il piano di centramento inclinato su cui verrà appoggiato il blocco per la calibrazione, mentre sulla destra è presente il piano di taglio con punta di fresa a coda di rondine. Il robot ABB 4600 svolge l'operazione di movimentazione del blocco seguendo il percorso più efficiente per la fresatura delle sei del componente.*



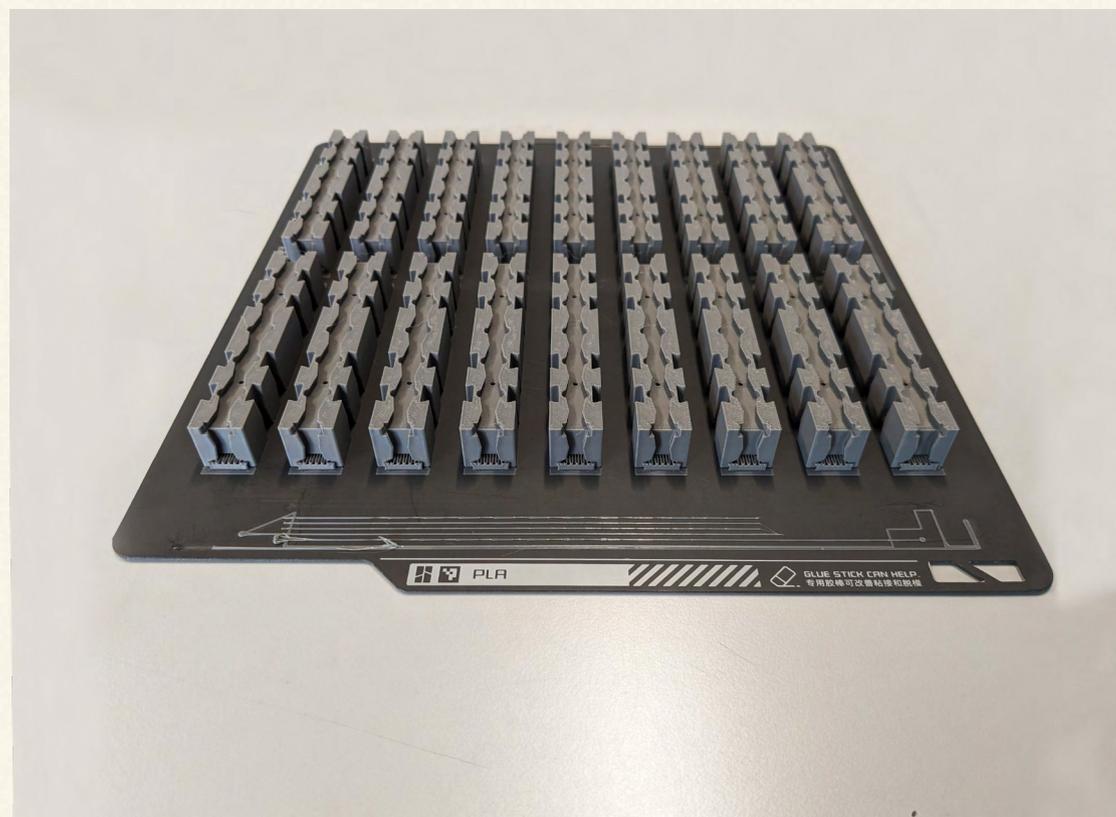
Per quanto riguarda la produzione dei differenti biscotti, invece, Legnotech si è affidato ad un collaboratore esterno in quanto la dimensione di questi componenti era del tutto di tipo falegnameristico, scala alla quale la Hundegger non avrebbe potuto lavorare. Per l'efficientamento dei tempi di produzione si è deciso di utilizzare pannelli di legno CLT da 30mm tagliati tramite fresatrice CNC a tre assi con punta a candela e successivamente pantografati ed uniti tramite viti autofilettanti: questo metodo di produzione avrebbe però comportato la produzione di biscotti con lati non a coda di rondine ma a 90 gradi, dunque andando a compromettere fortemente la tenuta meccanica del sistema costruttivo. Tenendo conto di ciò si è dunque deciso di provare a produrre manualmente un set di biscotti geometricamen-

te "corretti" presso IndexLab con sega circolare manuale su binario, avendo la possibilità di poter inclinare il taglio della lama e dunque poter produrre il biscotto con i lati a coda di rondine. Questa produzione "artigianale" di biscotti è stata necessaria per la dimostrazione della validità del sistema costruttivo e dei possibili limiti di produzione: essendo stati prodotti circa 30 biscotti a coda di rondine da personale non qualificato - ossia il sottoscritto - il livello qualitativo raggiunto ha comportato un grado di precisione relativamente basso, pur comunque dimostrando efficacemente la tenuta meccanica del sistema.

Di seguito sono riportate le immagini riguardanti i processi produttivi attuati e relativi test svolti per la produzione in serie del blocco LokAlp.



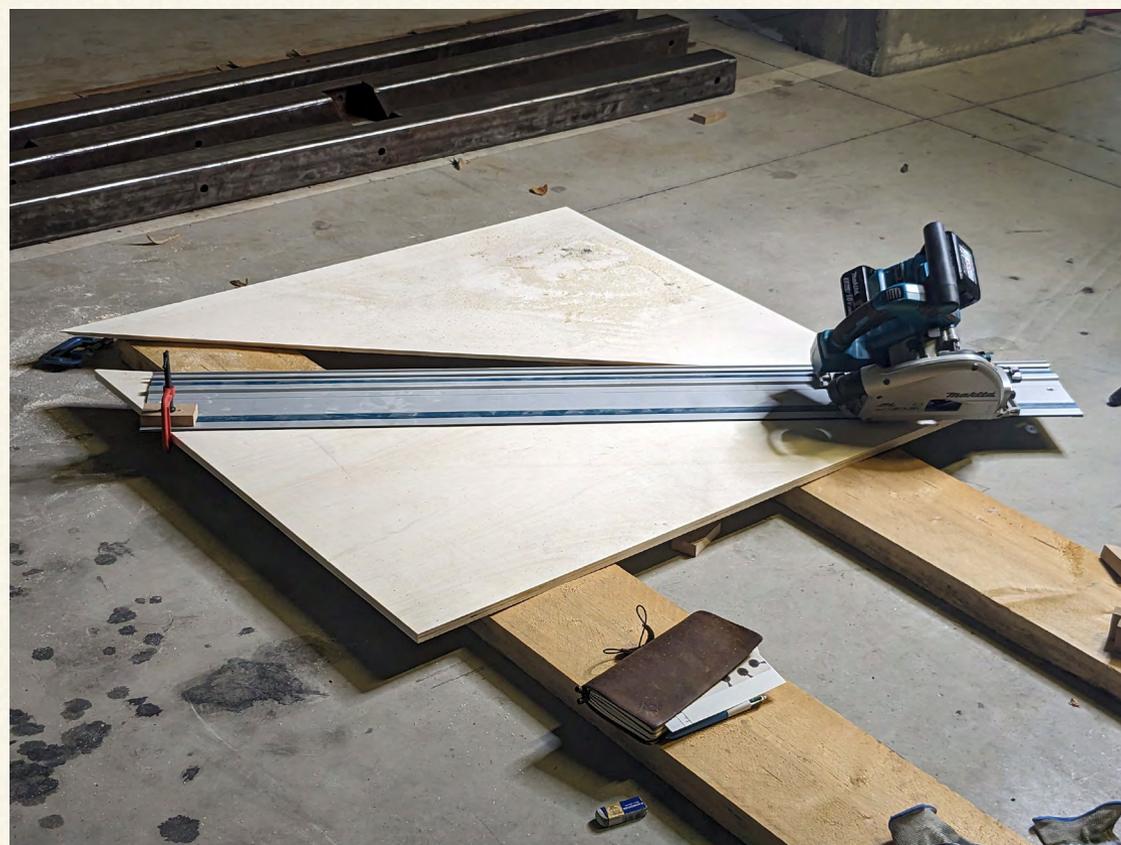
*Confronto produzione biscotti con lato a coda di rondine prodotti manualmente con sega circolare vs biscotti prodotti industrialmente con lati a 90 gradi con fresatrice CNC a tre assi.*



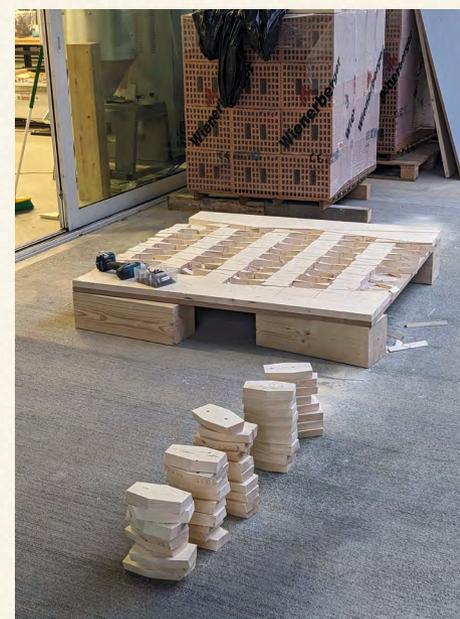
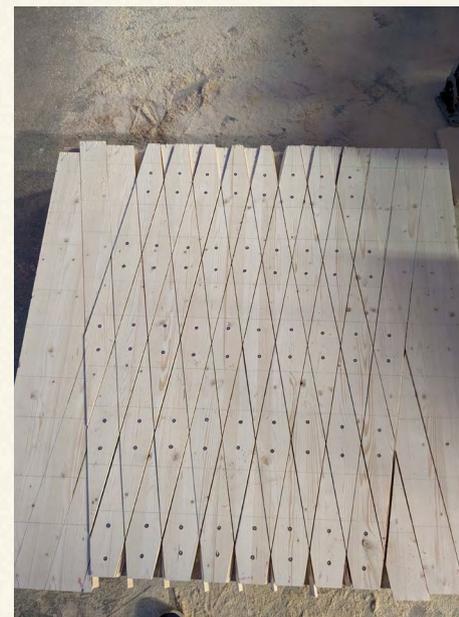
Produzione di 18 pezzi in scala 1:10 del modello Mk XI per la costruzione del modellino.



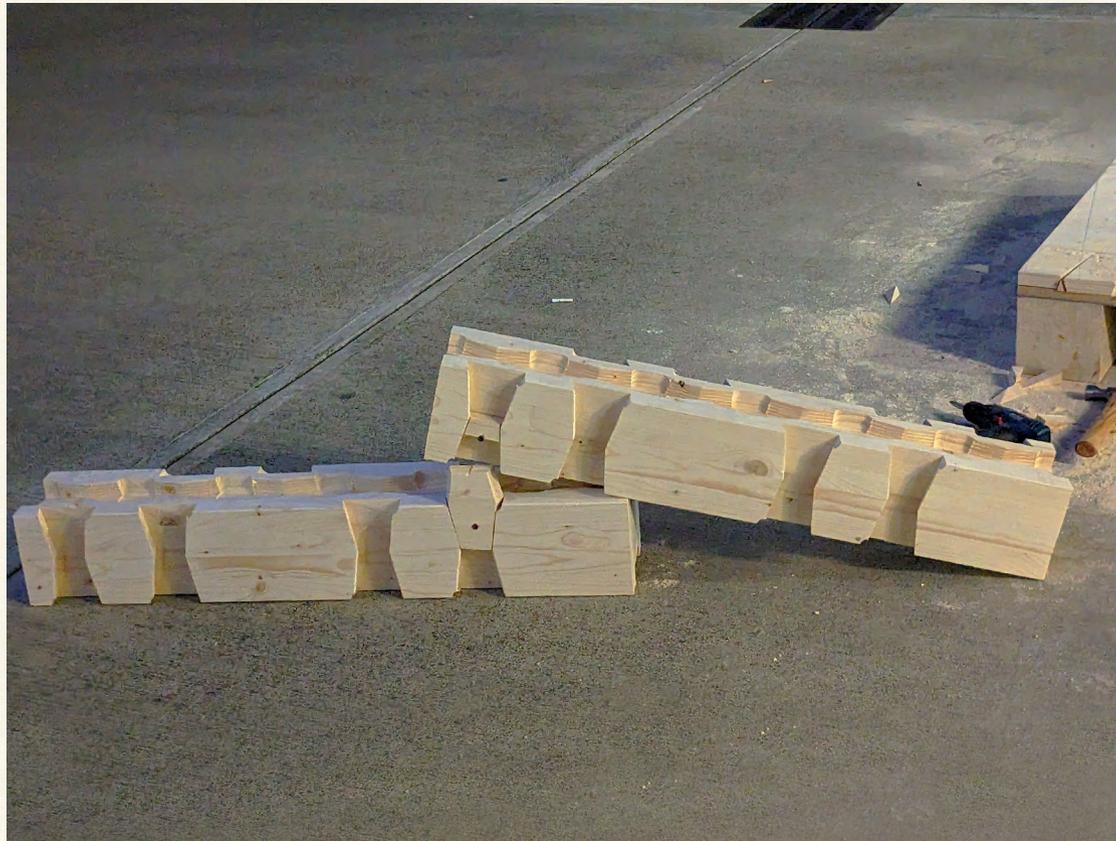
Montaggio del modellino in scala 1:10 modello Mk XI per la dimostrazione a Legnotech delle possibili configurazioni e connessioni disponibili.



Fase di cantierizzazione per la costruzione del piano di centraggio.



Step successivi per la produzione manuale di biscotti esagonali con coda di rondine basati su pannelli CLT da 30mm.



*#1 Goliardica e non professionale prova meccanica di resistenza a trazione del biscotto esagonale. Un operatore del peso di 70kg si è posizionato sulla punta estrema della trave a sbalzo, quest'ultima sorretta esclusivamente da un unico biscotto esagonale e due viti da 60mm. La rottura si è verificata in quanto la produzione del biscotto è stata svolta con la venatura parallela rispetto ai lati corti presentando chiaramente un punto debole.*



*#2 Goliardica e non professionale prova meccanica di resistenza a trazione del biscotto esagonale. Un operatore del peso di 70kg si è posizionato sulla punta estrema della trave a sbalzo, quest'ultima sorretta esclusivamente da un unico biscotto esagonale e due viti da 60mm. La rottura non si è verificata in quanto la produzione del biscotto è stata svolta con la venatura perpendicolare rispetto ai lati corti: le viti si sono dunque solamente piegate senza portare a rottura il biscotto, dimostrando grande resistenza di quest'ultimo.*



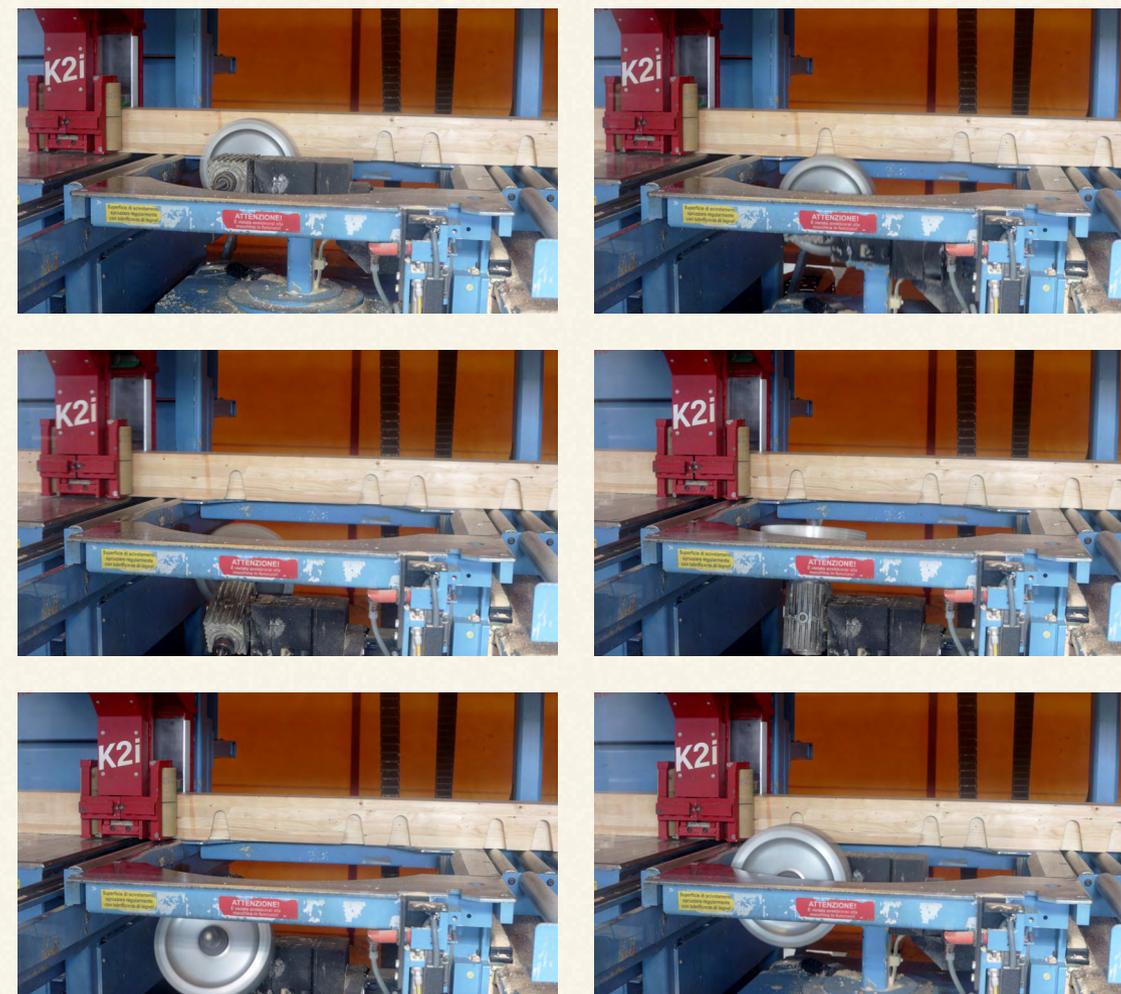
*Impianto di produzione di Legnotech presso Tirano, vista superiore del centro di taglio Hundegger K2i.*



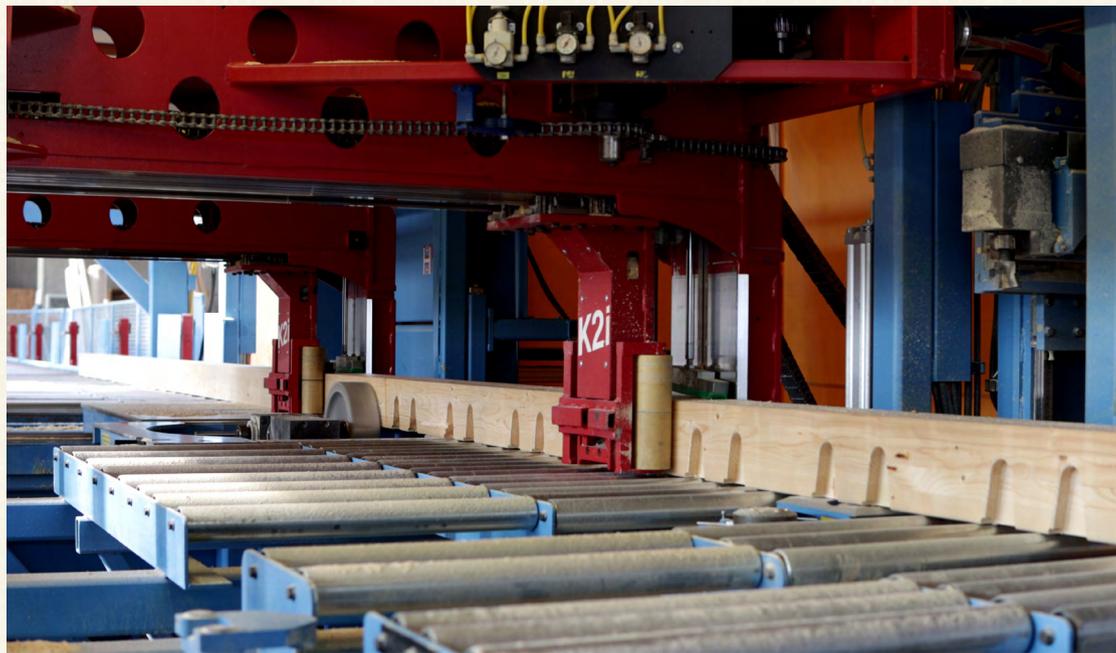
*Impianto di produzione di Legnotech presso Tirano, vista inferiore del centro di taglio Hundegger K2i.*



*Fase di taglio con sega circolare verticale per la produzione del blocco LokAlp Mk XII da 960mm di lato.*



*Fase di fresatura di incastri a coda di rondine laterali "a clessidra" per la produzione del blocco LokAlp Mk XII da 960mm di lato.*



*Zoom della trave di 9 metri di lunghezza utilizzata per la produzione del blocco LokAlp Mk XII da 960mm di lato.*



*Fase di fresatura di incastro a coda di rondine frontale "a clessidra" e successivo taglio con sega circolare verticale per la produzione del blocco LokAlp Mk XII da 960mm di lato.*

### 5.2.3 Esposizione

Indexlab è da tempo partner di una delle due storiche fiere nazionali legate al settore edilizio: assieme a Madexpo, il “Salone Internazionale dell’Industrializzazione Edilizia” SAIE - attiva dal 1965 - è la più grande fiera italiana delle costruzioni che raggruppa ogni anno centinaia di espositori, aziende e progettisti sotto il tema dell’industrializzazione e dell’innovazione nell’edilizia. Attiva in alternanza annuale tra le città di Bologna e Bari, l’edizione 2023 si è svolta nel capoluogo pugliese all’interno dell’ampio padiglione della Nuova Fiera del Levante tra il 19 e 21 ottobre 2023, raggiungendo il record per l’edizione barese di 25.527 visitatori e 407 espositori. La partecipazione di Indexlab all’interno del SAIE è di fatto un caso unico: il centro di ricerca del Politecnico di Milano, infatti, esibisce ogni anno i traguardi raggiunti dalla ricerca e sviluppo in collaborazione con le aziende partner, dimostrando in chiave estremamente innovativa come la

digitalizzazione e la robotizzazione dei processi produttivi possa portare a considerevoli vantaggi dal punto di vista dell’efficientamento della catena di produzione e più in generale della progettazione industrializzata. Nel caso specifico, Indexlab ha esposto quattro progetti finanziati da sei aziende partner, ed il progetto LokAlp è stato interamente finanziato dal punto di vista della produzione da parte del partner Legnotech.

La progettazione del padiglione è stata basata su pochi semplici parametri: lo spazio espositivo necessario sarebbe stato di circa 4x6 metri, e l’opera avrebbe dovuto includere una porzione di seduta assieme ad una parte a sbalzo. L’interesse infatti non era quello di esporre una porzione di edificio classica - come per esempio una connessione angolare parete-solaio oppure un nodo strutturale trave-pilastro - ma era quello di produrre una sorta di scultura a scala architettonica che

catturasse l’attenzione dei visitatori ed al tempo stesso dimostrasse la validità del sistema costruttivo dal punto di vista statico.

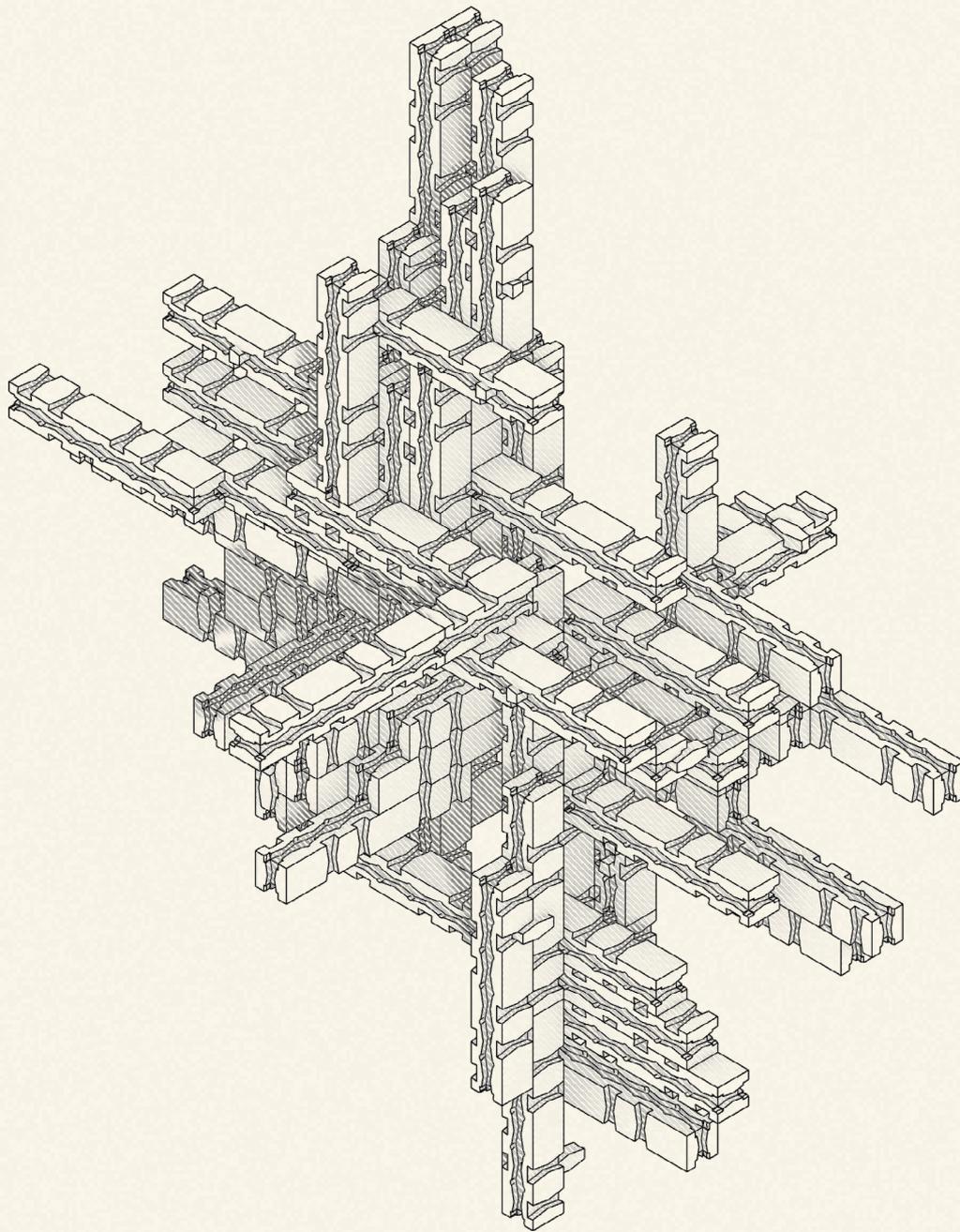
La progettazione del padiglione ha inizialmente coinvolto l’utilizzo del plugin “WASP” di Grasshopper, sviluppato dal ricercatore Andrea Rossi (Rossi 2023) per la modellazione del padiglione:

*“WASP is a framework to model discrete aggregations of repetitive units, providing methods to describe both geometry and topology of each part, define connectivity rules, and quickly convert continuous material gradient fields to modular assemblies of simple parts. [...] Within such design framework, users are provided with different aggregation procedures to select rule sequences controlling the final outcomes, as well as utilities for part collisions avoidance, visualization, and editing of the produced geometries.”*  
(Rossi 2019, p. 7)

*“WASP è un framework per modellare aggregazioni discrete di unità ripetitive che fornisce metodi per descrivere sia la geometria che la topologia di ogni parte, definire regole di connettività e convertire rapidamente campi continui di gradienti di materiale in assemblaggi modulari di parti semplici. [...] All’interno di questo quadro progettuale, gli utenti hanno a disposizione diverse procedure di aggregazione per selezionare le sequenze di regole che controllano i risultati finali, nonché strumenti per evitare le collisioni tra le parti, visualizzare e modificare le geometrie prodotte.”*

Il plugin WASP è, al momento corrente, il software per la generazione di aggregazioni di unità discrete più avanzato sviluppato sino ad ora: basandosi sul concet-

to di digital material, WASP è in grado di generare infinite soluzioni combinatorie in relazione alle differenti “regole” di connessione che il progettista ha determinato. Inoltre, la generazione di tali aggregazioni previene le potenziali collisioni che potrebbero essere sviluppate: Nel caso del blocco LokAlp Mk XII, infatti, vi è la possibilità di generare potenzialmente 44 combinazioni, ma solamente 22 blocchi possono essere posizionati contemporaneamente a partire dal blocco generativo di base.



*Generazione stocastica  
dell'aggregazione  
del digital material  
LokAlp Mk XII - 300  
unità generate (blocchi  
+ biscotti)*

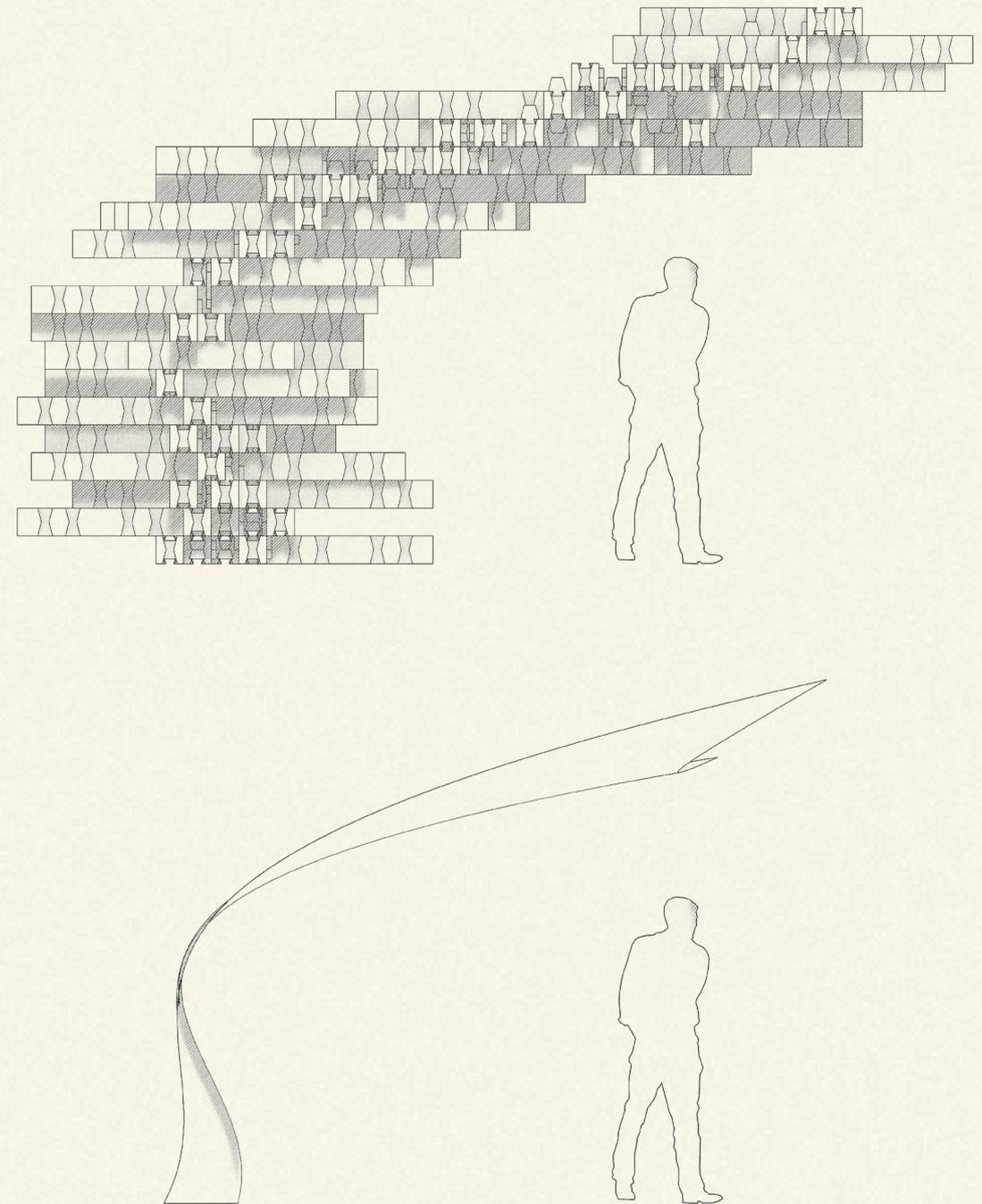
La generazione delle aggregazioni può avvenire con differenti metodologie: la più semplice, ossia la generazione stocastica (dunque “casuale” o “aleatoria”), è basata solamente sulla tipologia di regole inserite dal progettista e il numero di unità che si vogliono generare; in questo caso, dunque, ogni nuova generazione dell’aggregazione sarà completamente differente, in quanto dovuta esclusivamente “al caso” (o per meglio dire, alle infinite tipologie di potenziali aggregazioni dettate dalle regole decise inizialmente). Questa tipologia di aggregazione non ha particolari vantaggi dal punto di vista della progettazione, in quanto totalmente aleatoria e dettata dalla casualità della generazione, ma è molto utile per comprendere a livello compositivo-concettuale le potenziali forme ed espressioni che un determinato digital material può esprimere: nel caso del blocco LokAlp, infatti, vi è una probabilità statistica estremamente maggiore (secondo una generazione stocastica) di generare dei biscotti anziché dei blocchi; questa caratteristica è dovuta dal fatto che ogni blocco LokAlp generato dà la possibilità di generare a sua volta 44 potenziali biscotti, mentre ogni nuovo biscotto generato dà a sua volta la possibilità di generare una o massimo tre blocchi, in base alla sua tipologia. La generazione stocastica, dunque, pur non presentando una diretta

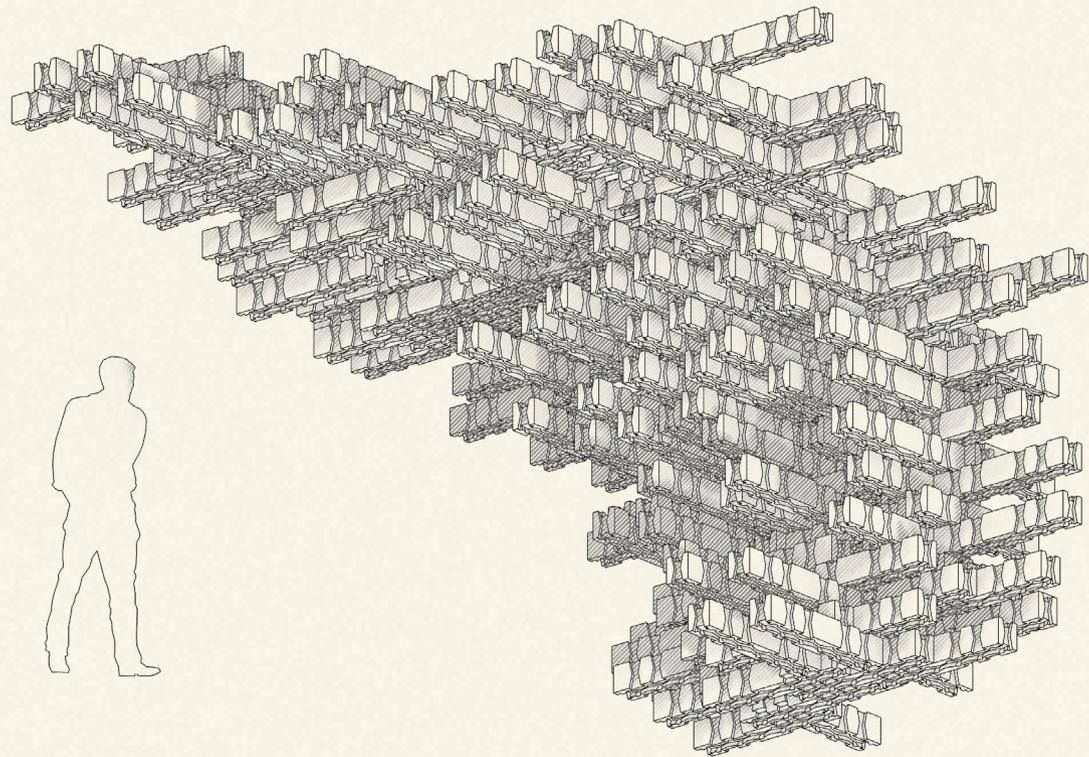
utilità a livello tecnico, presenta il grande vantaggio di esprimere nella maniera più sincera possibile la volontà del digital material ideato: alcuni esempi sono stati riprodotti nel sottocapitolo 4.2 “Digital Material”, i quali rappresentano chiaramente le diverse volontà compositive dei singoli blocchi ideati, le quali sono dettate dalle regole di assemblaggio predeterminate e dalle forme di dei blocchi. Nel caso di LokAlp, come vi era da aspettarsi, l’aggregazione stocastica generata è fortemente massiva ed ermetica, essendo tale blocco ispiratosi dalla tecnica costruttiva blockbau.

Una seconda tipologia di generazione di aggregazione è invece dettata – oltre che dalle regole delle connessioni e dal numero totale di unità da generare – dai cosiddetti “constraints” o vincoli: queste tipologie di vincoli possono essere di varia natura – una linea, una superficie, un piano o un volume – e vengono utilizzate dal digital material come “archetipi” da riprodurre. Prendendo ad esempio un cubo, e volendo “riempire” il cubo con l’aggregazione da noi generata, il plugin WASP tenterà di discretizzare nella maniera più accurata possibile la forma “cubo” secondo il digital material fornito e le sue suddette regole. Il vantaggio di questo metodo è che non si basa sulla generazione aleatoria e casuale di una forma casuale, ma si fonda sulla generazione dell’aggregazione più corretta che meglio descrive quello specifico cubo: per tale motivo, dunque, la soluzione è unica e la generazione di una nuova aggregazione basata sul cubo porterà sempre al medesimo risultato prodotto precedentemente. L’utilizzo di vincoli – che essi siano volumi, superfici o linee – porta dunque alla possibilità di poter applicare la generazione automatica di aggregazioni alla progettazione architettonica: in questo caso, infatti, è possibile poter modellare manualmente l’oggetto architettonico desiderato – come per esempio un’abitazione residenziale – e generare automaticamente all’interno del volume delle sue pareti e solai l’aggregazione basata sul digital material, la cui soluzione sarà sempre unica. Questo metodo di progettazione è stato testato per la genera-

zione della forma del padiglione per l’esposizione al SAIE 2023: basandosi sulla necessità di sviluppare una porzione a sbalzo, è stata modellata manualmente una semplice superficie a doppia curvatura con un’area sporgente che ricordasse parzialmente delle coperture delle pensiline per l’attesa dei mezzi pubblici: essendo la superficie disegnata un vincolo, il risultato aggregativo che avrebbe descritto al meglio la superficie modellata sarebbe stato l’unica soluzione possibile. Il risultato ottenuto, pur essendo estremamente interessante, non è stato comunque il progetto utilizzato per l’esposizione: pur essendo infatti un’interessante prova di forza della generazione computazionale automatica di aggregazioni, è da sottolineare il fatto che si tratti ancora di una tipologia di progettazione con ampi margini di miglioramento. Nel caso specifico di LokAlp, infatti, la principale problematica era rappresentata dal fatto che il plugin WASP non fosse sviluppato per offrire un’analisi statico-strutturale integrata (in quanto questa tipologia di analisi è ampiamente indagata da altre tipologie di plugin Grasshopper): per questioni di tempistiche legate alla progettazione non si è potuto integrare questi tipi di calcoli strutturali con le aggregazioni generate da WASP, e per tale motivo si è deciso di non farsi carico del potenziale rischio morale – e penale – di realizzare un padiglione a sbalzo di tre metri d’altezza e di più di una tonnellata di peso che potesse ledere all’incolumità delle migliaia di visitatori che hanno interessato l’edizione SAIE 2023.

*Test padiglione  
#1 - Generazione  
dell’aggregazione  
del digital material  
LokAlp Mk XII con  
vincolo di superficie  
a doppia curvatura.  
Vista laterale.*





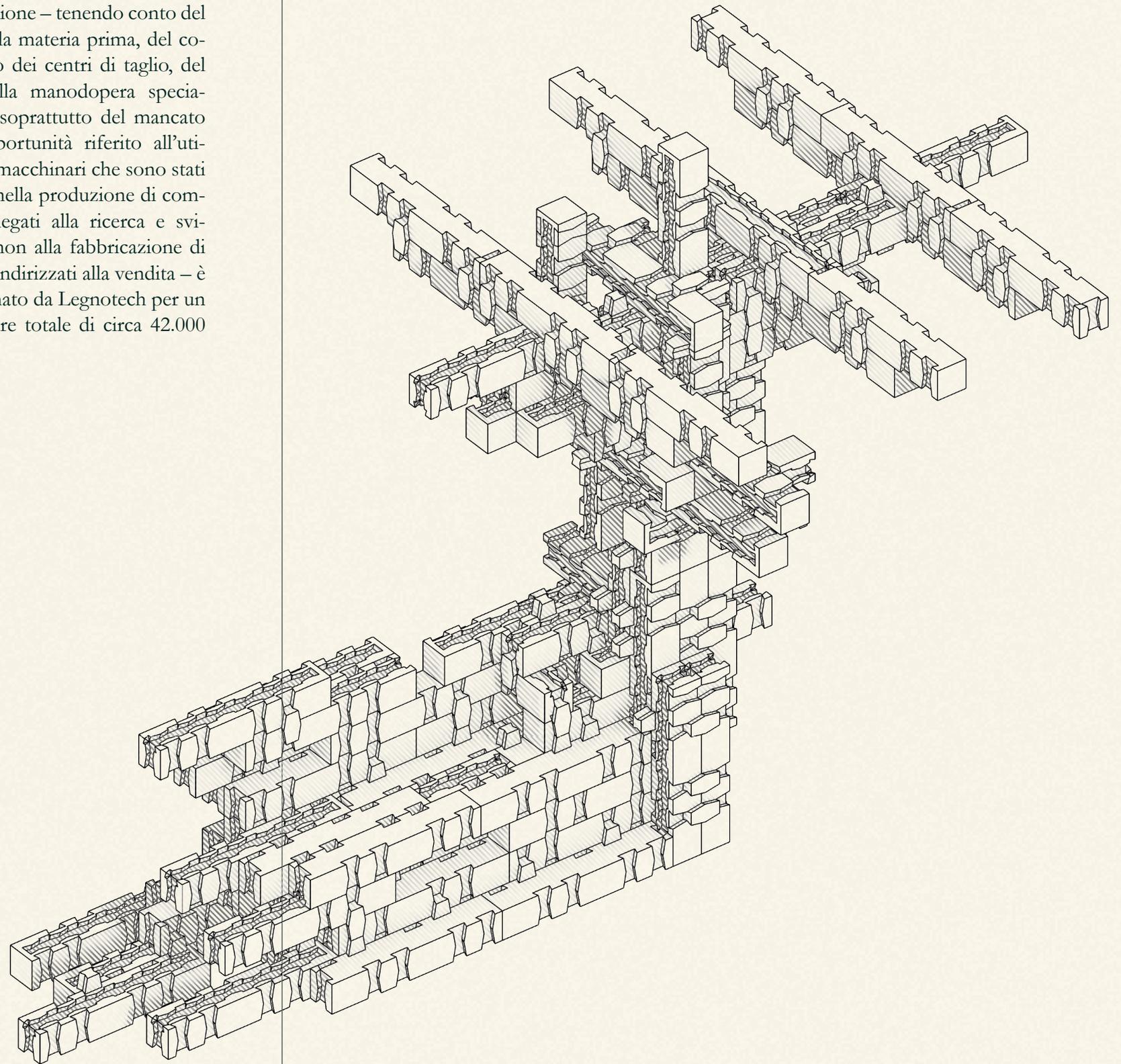
*Test padiglione #1 - Generazione dell'aggregazione del digital material LokAlp Mk XII con vincolo di superficie a doppia curvatura. Assonometria.*

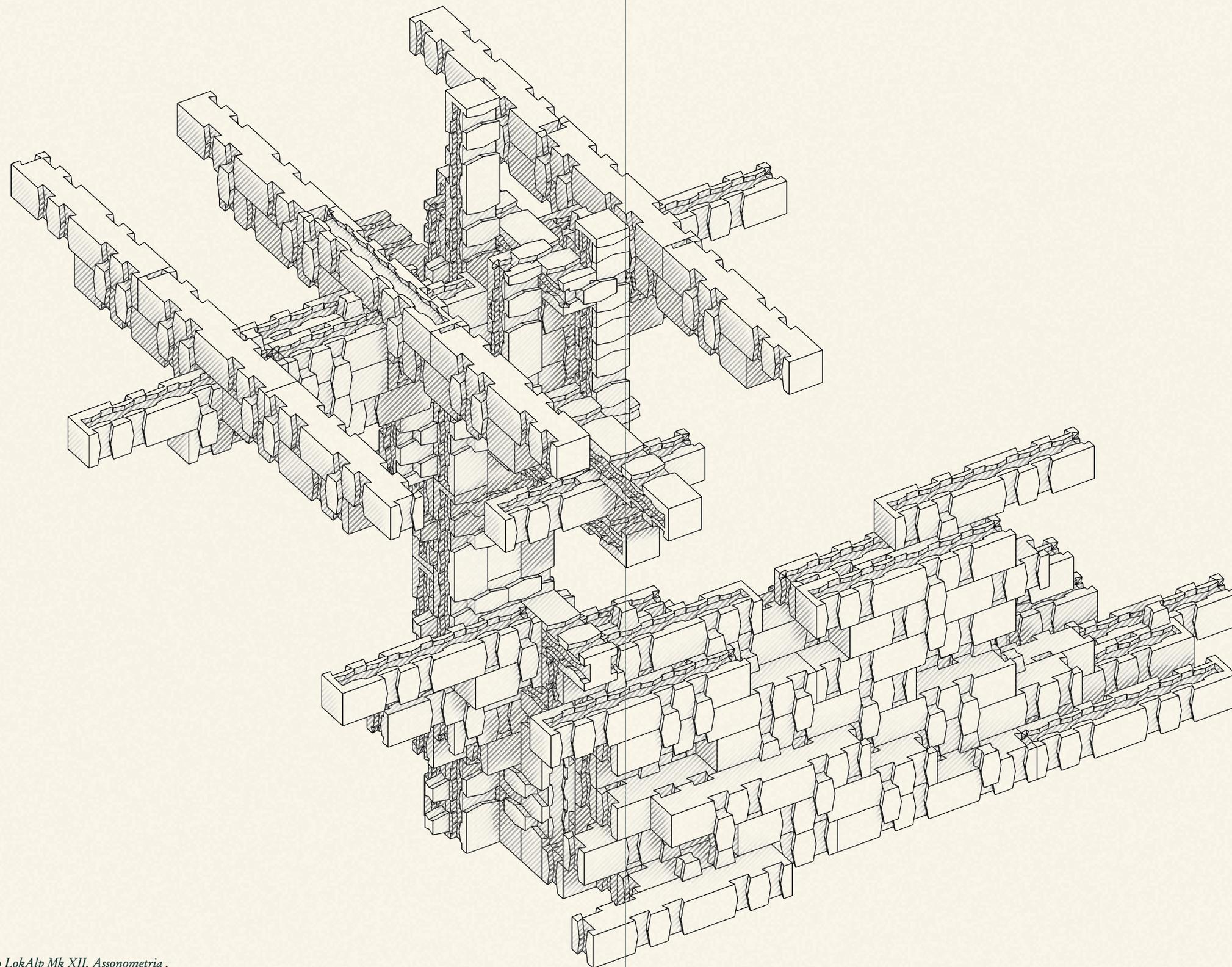


*Test padiglione #1 - Superficie a doppia curvatura utilizzata come vincolo di superficie per la generazione dell'aggregazione del padiglione.*

La seconda ed ultima versione del padiglione è stata dunque progettata posizionando “manualmente” i singoli blocchi in un’aggregazione che rappresentasse una seduta con una porzione a sbalzo: il risultato ottenuto ha cercato di mimare in una certa maniera astratta la morfologia di un pilastro supportante una trave principale, la quale a sua volta sorreggeva tre travi secondarie. Questa composizione tettonica dimostrerebbe con una certa chiave eccentrica una possibile porzione di solaio con le differenti orditure, pur comunque cercando di non essere troppo didascalica per catturare l’attenzione dei visitatori. La composizione finale è stata di 132 unità – composta da 117 blocchi LokAlp Mk XII e 15 blocchi LokAlp Mk XII “Short” -, 240 biscotti esagonali tipo E, 21 biscotti tipo F e 7 biscotti tipo I. L’azienda Legnotech, come sottolineato in precedenza, si è occupata totalmente della produzione di tutti i componenti: per efficientare la produzione dei blocchi è stato concordato di produrre una porzione di essi senza le fresate delle facce superiori e inferiori, abbattendo i tempi di produzione per unità da circa 40 minuti a soli 10 minuti. Dei 117 blocchi LokAlp Mk XII prodotti, dunque, 74 furono prodotti senza le fresate superiori/inferiori, mentre i restanti 43 furono prodotti da progetto. L’investimento per la produzione

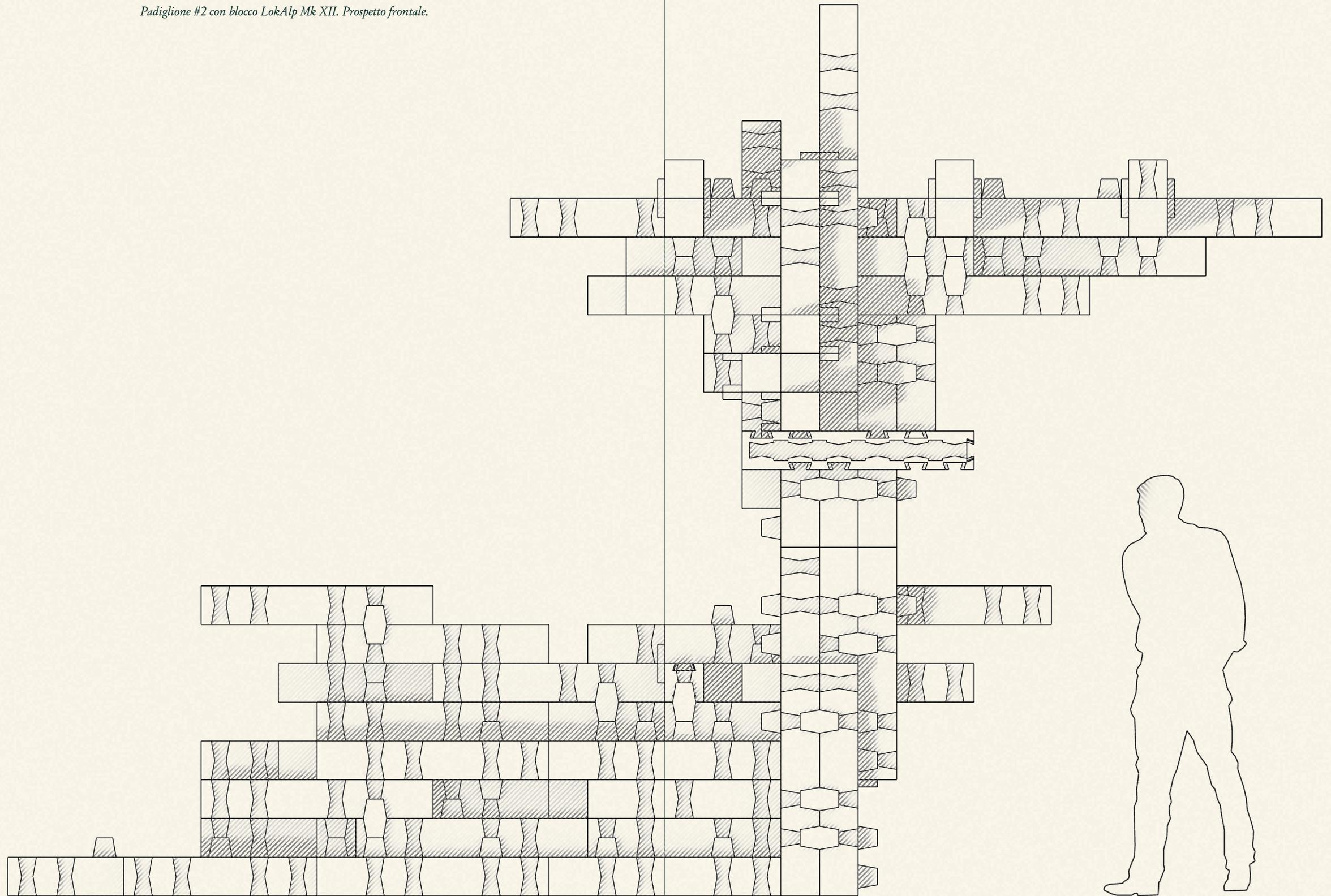
dei padiglione – tenendo conto del costo della materia prima, del costo orario dei centri di taglio, del costo della manodopera specializzata e soprattutto del mancato costo-opportunità riferito all’utilizzo dei macchinari che sono stati devoluti nella produzione di componenti legati alla ricerca e sviluppo e non alla fabbricazione di prodotti indirizzati alla vendita – è stato stimato da Legnotech per un ammontare totale di circa 42.000 euro.

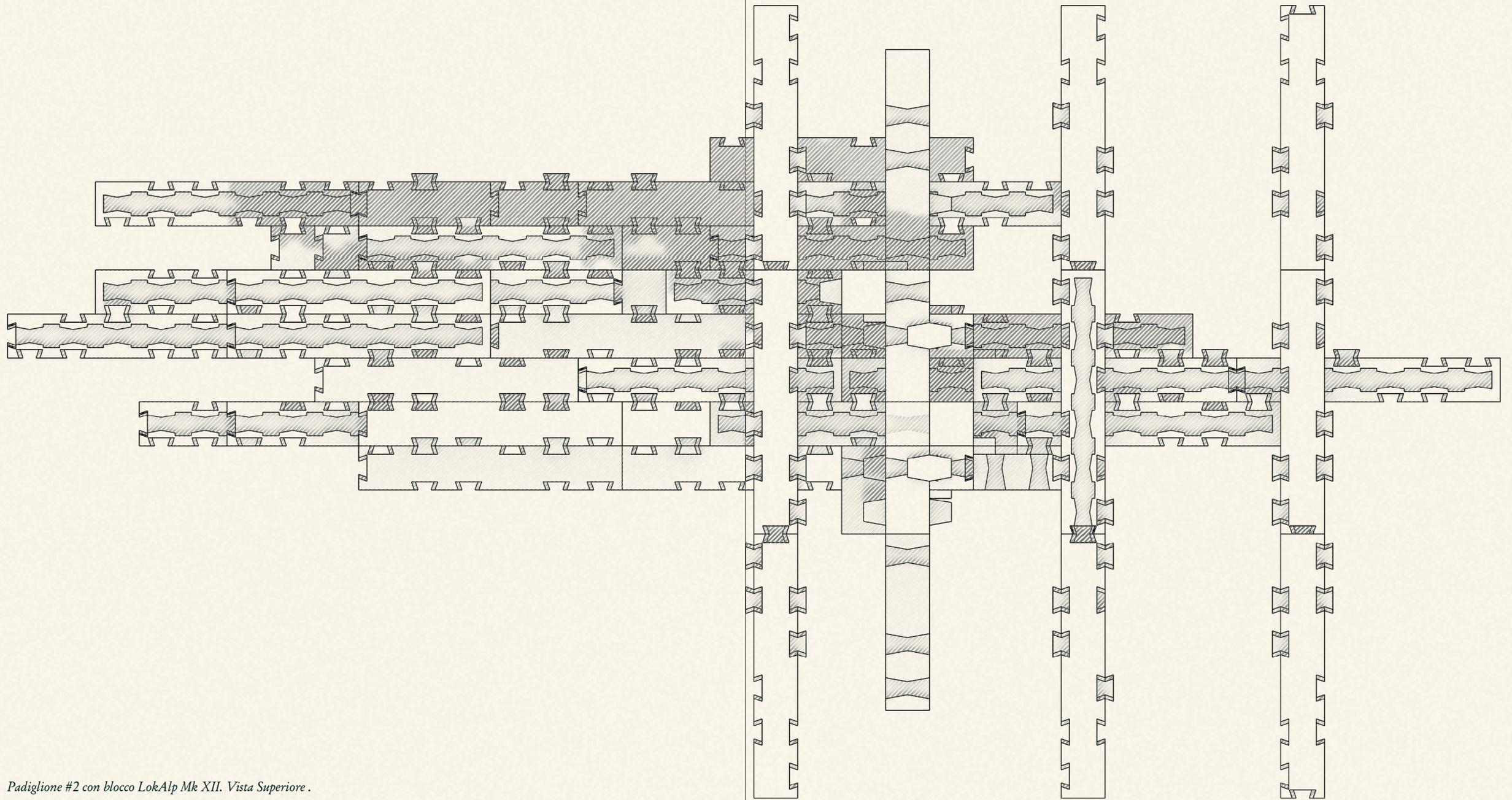




Padiglione #2 con blocco LokAlp Mk XII. Assonometria .

Padiglione #2 con blocco LokAlp Mk XII. Prospetto frontale.



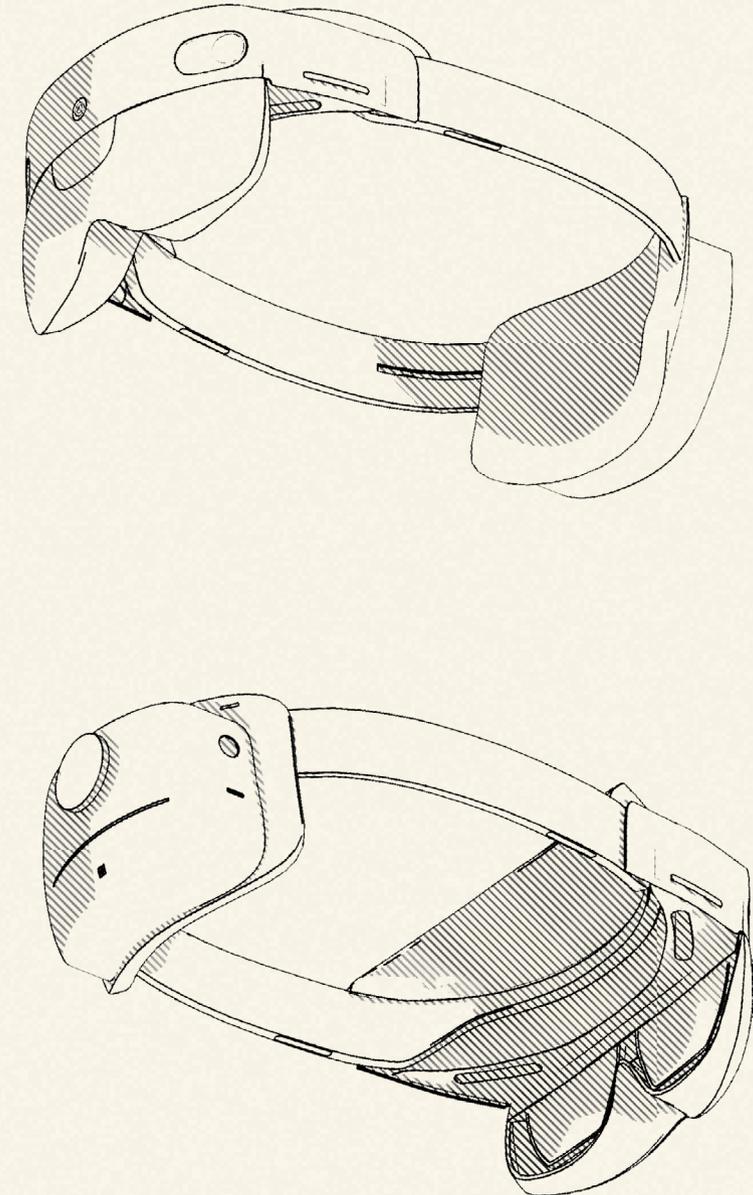


Padiglione #2 con blocco LokAlp Mk XII. Vista Superiore .

Per quanto riguarda l'assemblaggio del padiglione, è stato essenziale affidarsi alla tecnologia basata sulla realtà aumentata: il montaggio dei 132 blocchi LokAlp e le relative centinaia di biscotti di connessione, infatti, non seguiva alcun pattern ripetitivo, e per tale motivo non si potevano descrivere "regole" da seguire per l'assemblaggio. Inoltre, le rappresentazioni utilizzate tipicamente nella cantieristica per la costruzione di prefabbricati edilizi – vale a dire piante, sezioni, assonometrie, prospetti – sarebbero state estremamente limitanti in termini di tempo e chiarezza per descrivere in maniera bidimensionale come svolgere ogni singolo assemblaggio. Gli step da svolgere per la costruzione sarebbero stati esattamente 390, e ciò significa che sarebbero state necessarie 390 rappresentazioni da produrre graficamente all'interno di un manuale cartaceo, come appunto i manuali delle costruzioni LEGO. Tenendo conto che la richiesta di tempo non certo contenuta per la produzione di 390 assonometrie per l'assemblaggio, vi è anche da considerare il tempo di "consultazione" del manuale – che sia cartaceo o PDF – per il quale l'apparato visivo umano deve controllare più volte il posizionamento del blocco e la verifica della correttezza del posizionamento, dilazionando di gran lunga l'operazione di lettura delle regole per la costruzione. Tenendo conto di tali problematiche

*Rappresentazione  
assonometrica degli  
occhiali per la realtà  
aumentata Microsoft  
Hololens 2*

si è deciso di avvalersi dell'utilizzo degli Hololens 2 "Industrial", occhiali in realtà aumentata sviluppati da Microsoft utilizzati in differenti settori che spaziano da quello medico a quello dell'industria AEC. Nello specifico, tale tipologia di occhiali è stata utilizzata in cooperazione con plug-in "Fologram" per Grasshopper, il quale che permette il dialogo tra gli occhiali AR e il software di modellazione parametrica: tramite questo plugin è stato dunque possibile sviluppare il codice di assemblaggio che descrivesse esattamente passo per passo i 390 step da svolgere per completare il padiglione. Tramite la programmazione di uno slider incrementale è stato possibile realizzare un'interfaccia grafica interattiva che illuminasse di bianco il nuovo blocco o biscotto da posizionare, e che al tempo stesso rendesse "trasparente" i precedenti blocchi posizionati. Grazie a questo efficace metodo interattivo vi è riduzione quasi totale del rischio di scorretta messa in opera in quanto gli occhiali AR proiettano nel mondo reale il modello virtuale 3D in scala 1:1 del padiglione da costruire con una precisione quasi millimetrica – grazie al posizionamento di QR code sul pavimento utilizzati come marker per aumentare il livello di precisione – permettendo dunque all'operatore di sapere esattamente in che posizione e con quale ordine inserire ogni singolo componente.



Per assicurarsi della validità del padiglione – e soprattutto per il cronometraggio dei tempi di assemblaggio dell’opera, in quanto sarebbero stati disponibili solamente due giorni e mezzo per la costruzione durante l’allestimento del pre-fiera SAIE – si è deciso di svolgere un primo assemblaggio e smontaggio in loco presso la sede di produzione di Legnotech a Tirano. L’assemblaggio è stato svolto esclusivamente da parte di un solo operatore – il sottoscritto – in quanto vi era da assicurare la certezza di rimanere entro i tempi dell’allestimento, ed è stato svolto con gli occhiali in realtà aumentata sopra citati.

Durante il primo giorno di montaggio presso Legnotech, il 4 ottobre 2023, oltre a piccoli errori di numeri di produzione di biscotti tale per cui sono stati fabbricati 250 unità di tipo F e 50 unità di tipo E, mentre doveva essere l’inverso – sempre a causa esclusiva del sottoscritto –, il principale problema venuto a capo riguardava la connessione biscotto-blocco: come già descritto in precedenza nel precedente sottocapitolo “Produzione”, per questioni di tempistiche e fattibilità tecnica si era deciso di produrre i biscotti con lati perpendicolari e non a coda di rondine. Andando dunque a perdere fortemente la valenza strutturale della connessione si è concordato con l’utiliz-

zo di viti per legno autofilettanti Rothoblass da 240mm di lunghezza e 6mm di diametro. L’utilizzo delle viti autofilettanti, oltre ad aumentare sensibilmente la resistenza strutturale grazie alla loro potere di “trazione” durante l’inserimento, ha permesso anche di “correggere” la messa in opera di determinati blocchi che risultavano difficoltosi da mettere in bolla semplicemente con l’utilizzo della mazzuola antirimbazzo. I giorni successivi – ovvero il 5 ottobre, 6 ottobre e 7 mattina – è stato possibile completare senza particolari difficoltà l’assemblaggio dell’intero padiglione, oltre che svolgere autonomamente la prima parte di smontaggio, successivamente completata da due operatori di Legnotech. L’assemblaggio da parte di un solo operatore non ha dimostrato particolari limitazioni: grazie all’utilizzo di un trabattello è stato possibile svolgere il montaggio autonomamente, pur con qualche difficoltà nella posa delle travi secondarie già pre-assemblate sul trabattello per un peso di circa 35kg. Dal punto di vista degli occhiali AR, invece, anche in questo caso non sono state evidenziate particolari problematiche: con l’utilizzo di un semplice Powerbank da appena 10.000 mAh – e con la carica delle batterie degli occhiali durante la pausa pranzo di circa un’ora – è stato possibile svolgere una giornata tipo di 8 ore senza l’interruzione dell’utilizzo

degli occhiali, dimostrando la validità dell’utilizzo di questo tipo di tecnologia anche in cantieri più tradizionali.

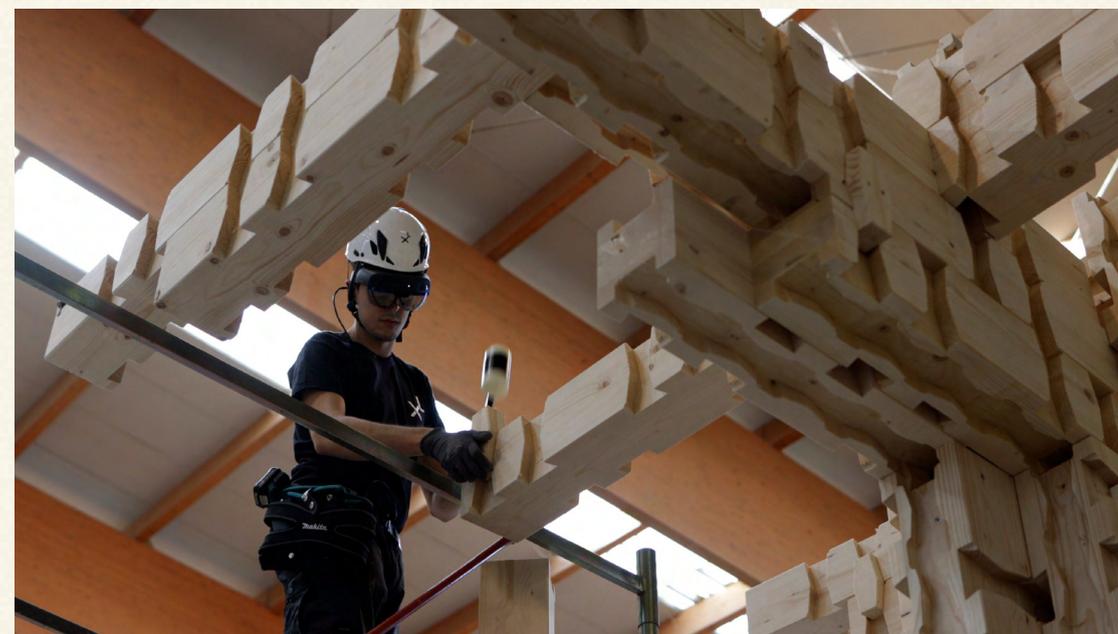
Successivamente smontato e disposto su 3 pallet, il padiglione è stato trasportato presso la Fiera del Levante il 16 ottobre 2023 ed assemblato nuovamente durante la fase di allestimento: durante i giorni della fiera SAIE 2023, dal 19 al 21 ottobre, il padiglione ha portato un considerevole successo da parte dei visitatori che si sono dimostrati particolarmente interessati e propositivi verso l’innovativo metodo costruttivo modulare, oltre che notevolmente incuriositi nel sistema in realtà aumentata utilizzato per l’assemblaggio.



#1 Test di assemblaggio a Tirano - Fissaggio blocco trave secondaria.



#1 Test di assemblaggio a Tirano - Fissaggio biscotto secondaria.



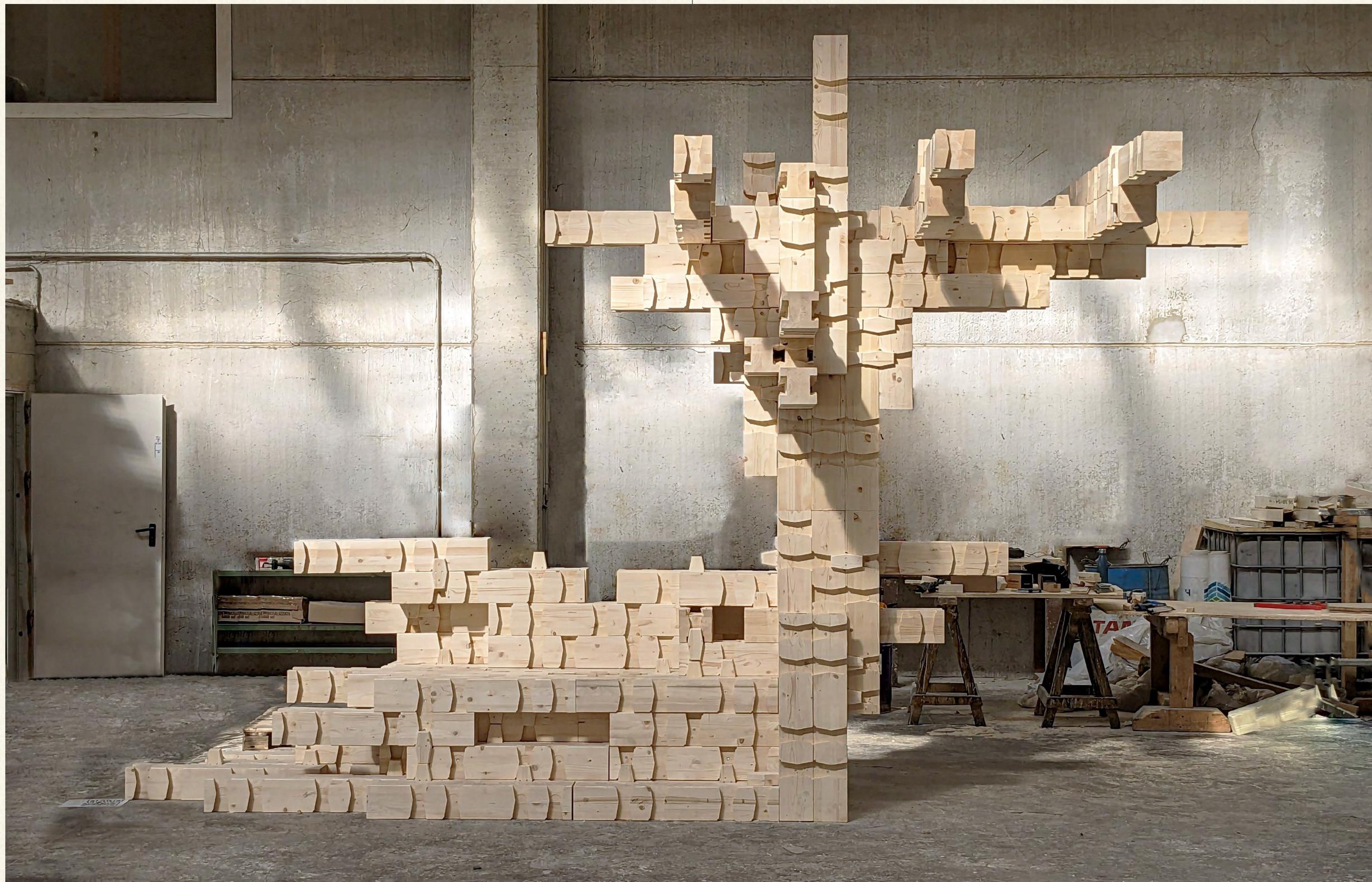
#1 Test di assemblaggio a Tirano - Inserimento biscotto.



#1 Test di assemblaggio a Tirano - Schermata interattiva in realtà aumentata.



#1 Test di assemblaggio a Tirano - POV schema interattivo in realtà aumentata.





Fiera SAIE 2023 - Padiglione Indexlab con i quattro progetti in esposizione.



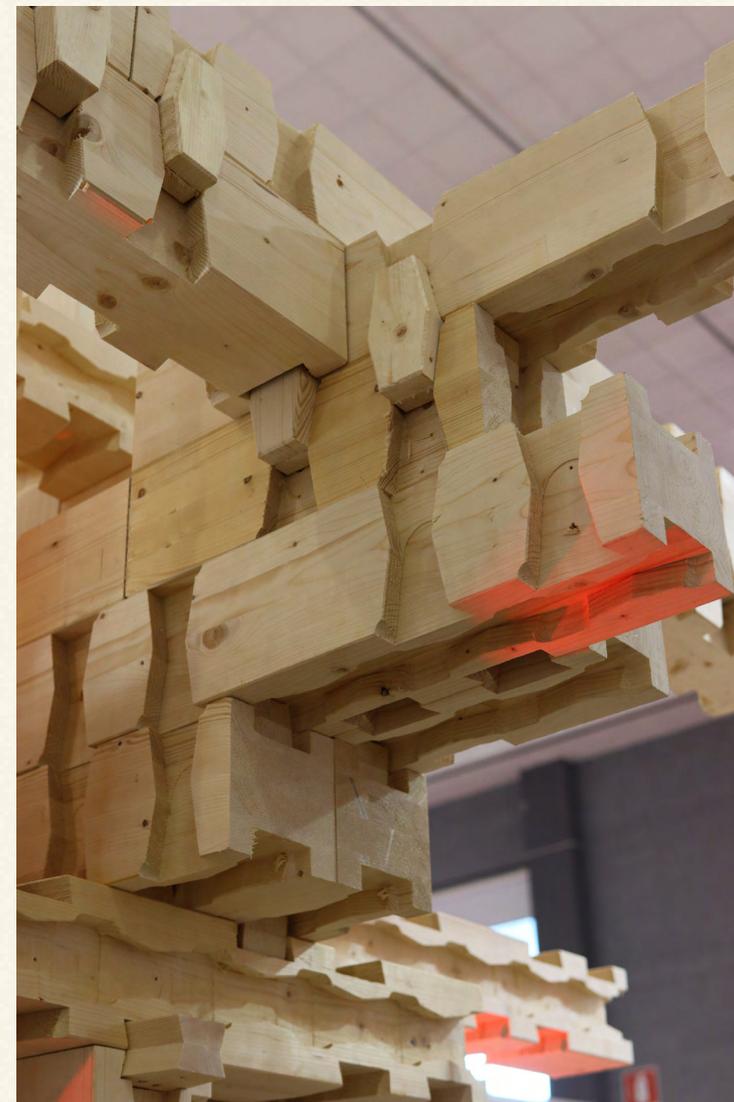
*Fiera SAIE 2023 - Thomas Miorin (fondatore e presidente di REbuild) alle prese con la realtà aumentata.*



*Fiera SAIE 2023 - piccoli progettisti alle prese con la realtà aumentata.*



Fiera SAIE 2023 - Dettaglio costruttivo del padiglione.



Fiera SAIE 2023 - Dettaglio costruttivo del padiglione.

## 5.3 Brevetto

In considerazione del fatto degli studi svolti nei riguardi dell'architettura modulare discreta – tutt'oggi argomento caldo e necessitante ancora di ampia ricerca in merito – e dei digital materials, in particolare considerando la peculiarità del sistema LokAlp di poter sviluppare – al contrario di altre configurazioni concorrenti – un sistema costruttivo impermeabile, senza aperture e potenzialmente staticamente adatto alla scala architettonica, si è ritenuta valevole la protezione della proprietà intellettuale tramite brevetto. Nello specifico, esistono due tipologie che vengono considerate nel linguaggio comune “brevetti”, nello specifico nel quadro dell'Unione Europea esiste il “Brevetto Europeo” ed il “Design e/o modello Comunitario Europeo”. Nel primo caso il “Brevetto Europeo” (fornito dall'European Patent Office) può essere registrato esclusivamente se presenta le caratteristiche di novità (ossia non precedentemente pubblicato e divulgato pubblica-

mente) di attività inventiva (intesa come scoperta non ovvia per un esperto nello specifico campo tecnico) e dimostrante una applicabilità industriale (ossia che contiene un'utilità pratica tecnica intrinseca e non astratta) (European Patent Office 2024).

Se i primi due punti – ossia novità e attività inventiva – possono essere chiari e scontati, il terzo punto riguardante l'applicabilità industriale è quello che delinea la grande differenza con il “Modello Comunitario Europeo”. Con applicabilità industriale, infatti, la Convenzione sul Brevetto Europeo (CBE) si riferisce al fatto che l'invenzione che si vuole registrare deve poter risolvere un problema tecnico-industriale, e ciò significa che, per esempio, non è possibile poter brevettare soluzioni a problemi puramente commerciali (come sconti con carte fedeltà) o scoperte, teorie e formule matematiche che non presentino una soluzione ad un problema tecnico

(come la scoperta di una nuova galassia o di una nuova proprietà fisica di un liquido). Gli stessi software non possono essere brevettabili, in quanto essi non sono altro che sequenze di codice non troppo dissimili in linea teorica a versi di una poesia (European Patent Office 2024). Un Brevetto Europeo, dunque, può essere registrabile quando dimostra la scoperta di una soluzione tecnica attuabile e utile per dei processi tecnici ed industriali: un esempio può essere il brevetto della stampa additiva 3D, di una stampante laser o di un nuovo processo produttivo per la conversione di rifiuti da grassi animali ed oli da cucina in combustibili rinnovabili, come dimostrato dai vincitori dell'European Inventor Award 2023 (European Patent Office 2023). Al contrario, il “Design e/o Modello Comunitario” è emesso dall'Ufficio dell'Unione europea per la proprietà intellettuale (EUIPO) secondo il Regolamento (CE) n. 6 /2002 sulla tutela dei disegni e modelli comunitari (CDR), ed esso è definito secondo i seguenti termini:

*“Per “disegno o modello” s'intende l'aspetto di un prodotto o di una sua parte quale risulta in particolare dalle caratteristiche delle linee, dei contorni, dei colori, della forma, della struttura superficiale e/o dei materiali del prodotto stesso e/o del suo ornamento. Per “prodotto” s'intende qualsiasi*

*oggetto industriale o artigianale, comprese tra l'altro le componenti destinate ad essere assemblate per formare un prodotto complesso, gli imballaggi, le presentazioni, i simboli grafici e caratteri tipografici, esclusi i programmi per elaboratori. L'esame non valuta se il prodotto rivendicato nella domanda venga effettivamente realizzato o utilizzato o possa essere realizzato o utilizzato in modo industriale o artigianale.”*  
(EUIPO 2023a)

Esistono differenti macro-gruppi, pur non esaustivi, proposti dal EUIPO che vanno ad evidenziare i possibili campi di applicazione dei modelli comunitari europei: nello specifico caso, LokAlp rientrerebbe potenzialmente nella categoria 4.1.1 denominata “cianografie, disegni tecnici, progetti di abitazioni o altri piani di architetti e progettazione d'interni o del paesaggio”. Come evidenziato dalla definizione sopra citata fornita da EUIPO, la caratteristica peculiare del design e/o modello europeo è quella di non dover presentare obbligatoriamente una applicabilità industriale, ossia di dover dimostrare una soluzione ad un problema tecnico. Nel caso di LokAlp, infatti, non è presente alcuna innovazione e/o scoperta nel campo produttivo, e per tale motivo l'unica caratteristica peculiare brevettabile è la forma dei suoi differenti componenti, per tale motivo si è deciso

di applicare la richiesta di brevetto nel sistema del “Design e/o modello Europeo” fornito da EUIPO.

Ritenuto valevole di investimento il sistema LokAlp da parte dell’Ufficio di Trasferimento Tecnologico (TTO) (ossia gli uffici presenti nelle differenti università e centri di ricerca preposti alla valorizzazione in termini economici dei risultati ottenuti dalla ricerca scientifica e tecnologica), il Politecnico di Milano ha deciso di investire in tale sistema finanziando la protezione della proprietà intellettuale; in collaborazione con Thinx, società di consulenza specializzata nella Intellectual Property Protection, il sistema LokAlp è stato registrato con successo e interamente pubblicato presso l’Ufficio dell’Unione Europea per la proprietà intellettuale il 7 novembre 2023 con il codice identificativo 015040194 (001-009) e con data di scadenza del modello al 7 novembre 2028, per una validità totale dunque di 5 anni. Il modello è stato depositato nel quadro della Classificazione di Locarno – ossia il sistema di classificazione internazionale per i disegni e modelli industriali gestito dall’Organizzazione Mondiale della Proprietà Intellettuale (OMPI) – (EUIPO 2023b) nella classe 25 “Building and construction Elements” con sottoclasse 02 “Prefabricated or pre-assembled building parts”.

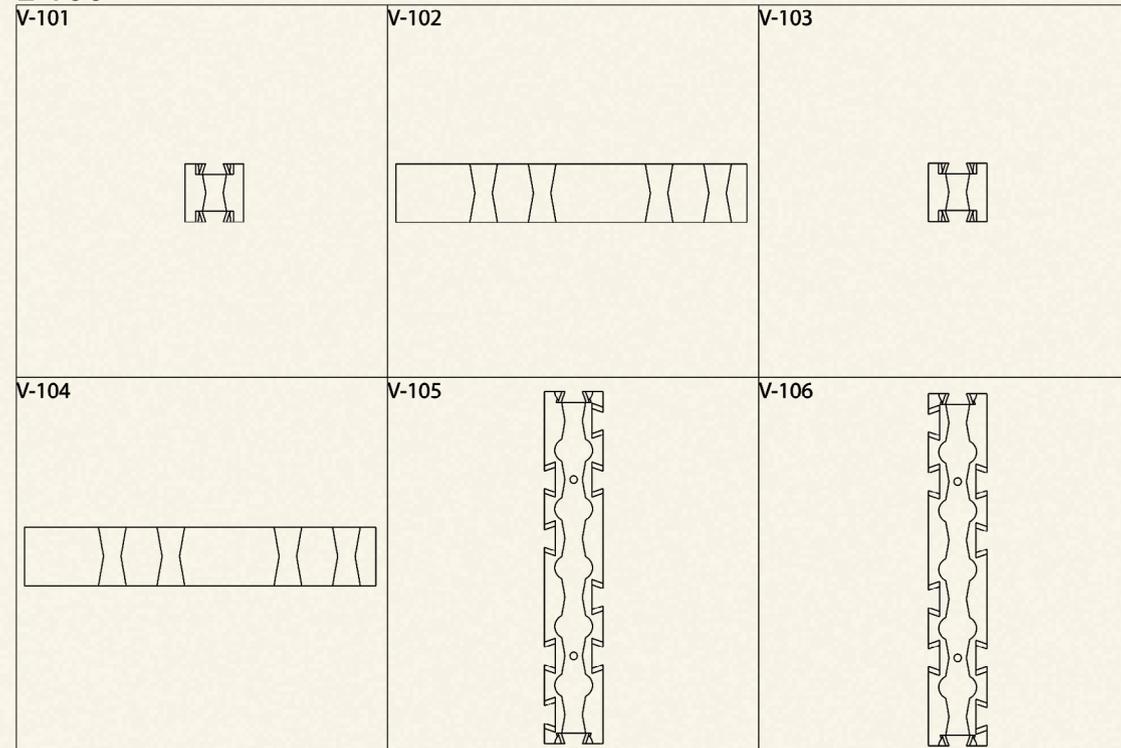
Visionabile presso differenti motori di ricerca quali DesignView (Design View 2024) o eSearchPlus (eSearchPlus 2024), il titolare nonché possessore del modello è il Politecnico di Milano, mentre gli autori sono il sottoscritto ed il suo relatore Pierpaolo Ruttico, con relativi codici identificativi 296912 e 269582.

Di seguito è ripotata la descrizione presentata per il deposito del modello attestante la logica tecnica del sistema LokAlp, oltre ad alcune delle rappresentazioni depositate all’Ufficio dell’Unione Europea per la proprietà intellettuale visionabili nei precedentemente accennati motori di ricerca. La descrizione del sistema deve essere chiara, comprensibile e senza potenziali incomprensioni o equivocità, e tali caratteristiche valgono anche per il deposito dei disegni, i quali sono stati eseguiti tutti al tratto nero per massimizzare la chiarezza ed al tempo stesso senza andare ad aggiungere informazioni aggiuntive non essenziali che andrebbero a limitare la protezione del modello, come la finitura superficiale del blocco oppure il suo materiale costitutivo.

LokAlp è un sistema di blocchi da costruzione modulari che permette la creazione di differenti tipologie di connessioni per la costruzione di travi, pilastri, murature, solette, coperture ed altri componenti edilizi. I due blocchi da costruzione sono gli elementi in figura A e B: il blocco da costruzione in figura B possiede le medesime caratteristiche del blocco da costruzione in figura A, ma è lungo la metà di quest’ultimo. La faccia minore dei blocchi A e B, visibile rispettivamente in V-101, V-103, V-201, V-203, è un quadrato. La lunghezza del lato lungo del blocco A è pari a 6 volte il lato del quadrato, ossia il lato minore del blocco. La lunghezza del lato lungo del blocco B è pari a 3 volte il lato del quadrato, ossia il lato minore del blocco. Il blocco A e il blocco B possiedono la stessa dimensione del lato corto, ossia il lato del quadrato. Tali proporzioni devono essere mantenute per qualsiasi lunghezza iniziale del lato del quadrato scelta. Gli elementi di connessione presenti nelle figure C - D - E - F - G - H - I sono denominati “biscotti” e sono il componente obbligatorio per connettere correttamente i blocchi di A e B. I Blocchi A possono essere connessi sia con blocchi A che blocchi B. I blocchi B possono essere connessi sia con blocchi B che con

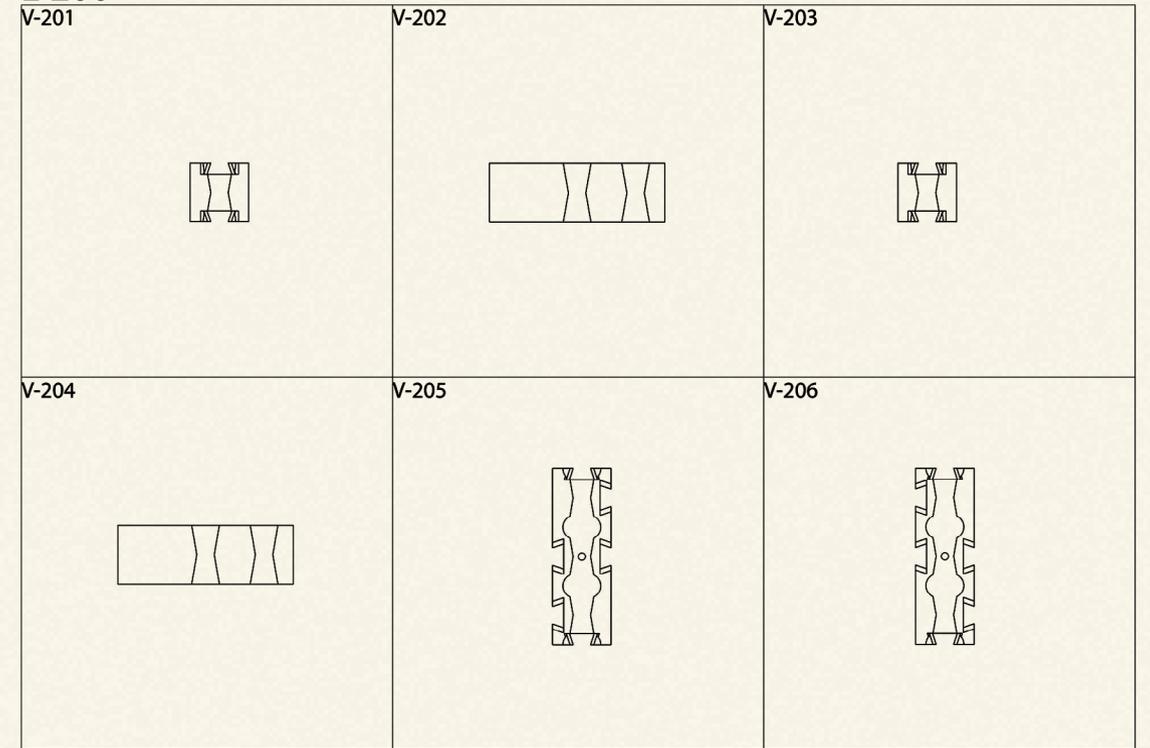
blocchi A. I biscotti da C a I non possono essere connessi con altri biscotti: i biscotti da C a I possono essere utilizzati per connettere i blocchi A con altri blocchi A, per connettere i blocchi B con altri blocchi B e per connettere blocchi A con blocchi B e viceversa. Il blocco A può ospitare un totale di ulteriori 24 blocchi di tipo A o B contemporaneamente, mentre il blocco B può ospitare contemporaneamente 12 blocchi di tipo A o B. I biscotti da C a G sono utilizzati per connettere saldamente i blocchi A e B tra di loro, mentre i biscotti H e I sono utilizzati come supporto di bloccaggio dei biscotti da C a G. I biscotti da H e I dunque non permettono autonomamente la connessione di due blocchi A-A, B-B, A-B o B-A. Le scanature dei blocchi A e B, visibili nelle rispettive tavole L-100 e L-200 possono possedere inclinazioni e profondità variabili, e tali proporzioni influenzano automaticamente le profondità e inclinazioni dei lati di tutti i biscotti. La profondità e l’inclinazione delle scanature è uguale per tutte le 6 facce dei blocchi A e B. La scelta di una differente profondità o inclinazione della scanatura non cambia né influenza le possibilità di connessioni dei differenti blocchi ed il numero totale di combinazioni disponibili.

**L-100**

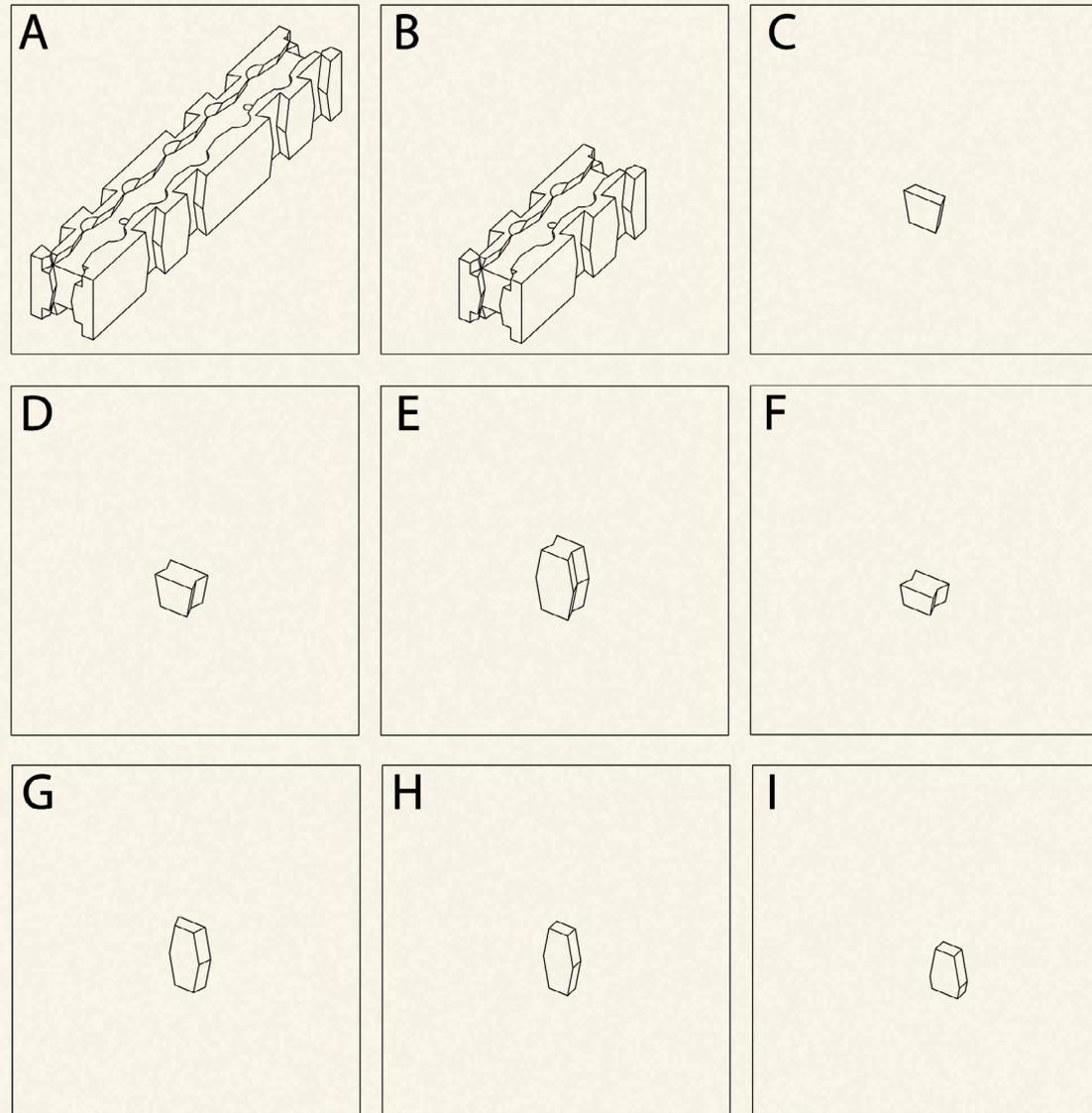


Proiezioni ortogonali del blocco LokAlp Mk XII.

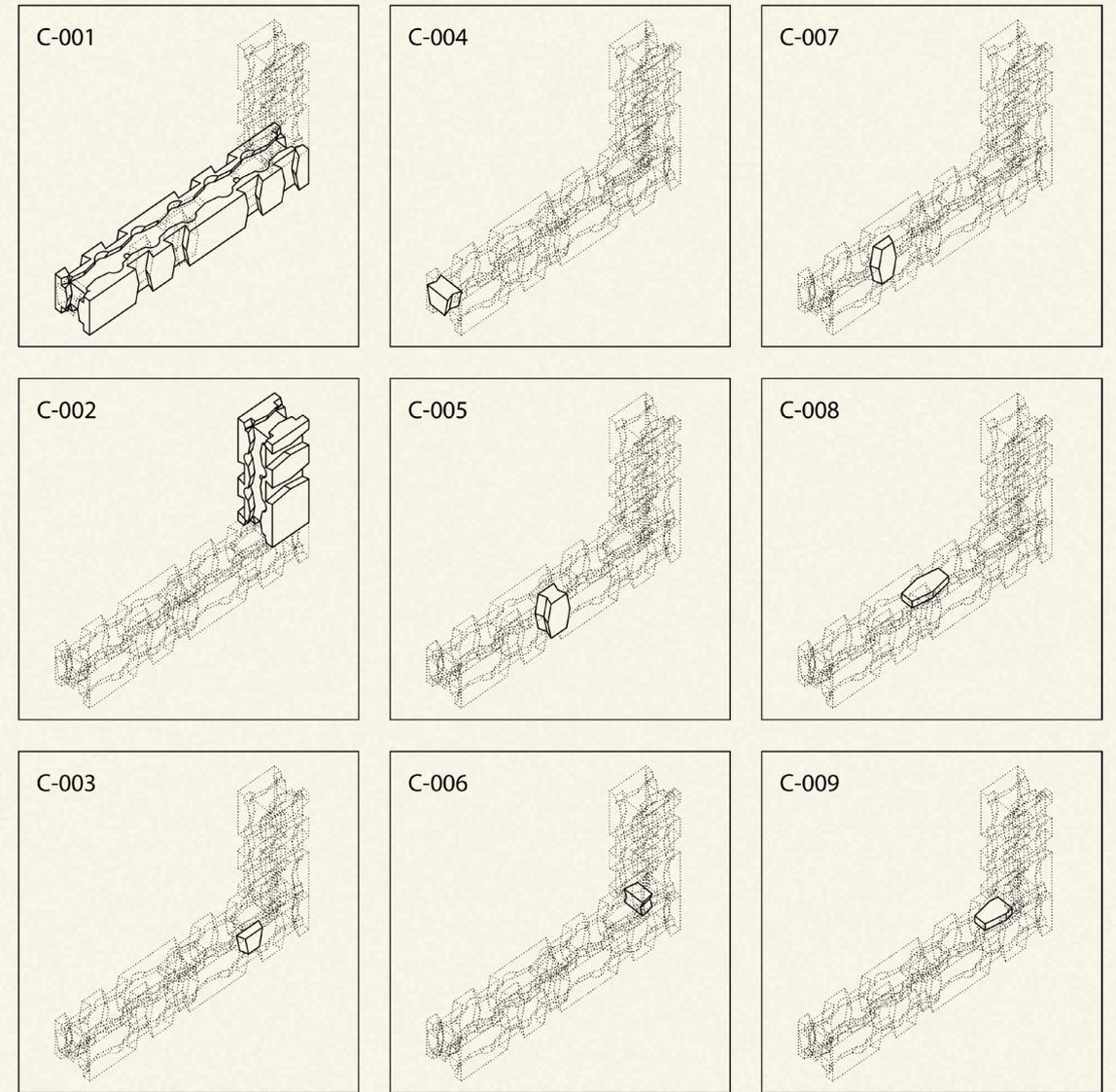
**L-200**



Proiezioni ortogonali del blocco LokAlp Mk XII "Short".



Vista assometrica dei 9 componenti del sistema LokAlp Mk XII.



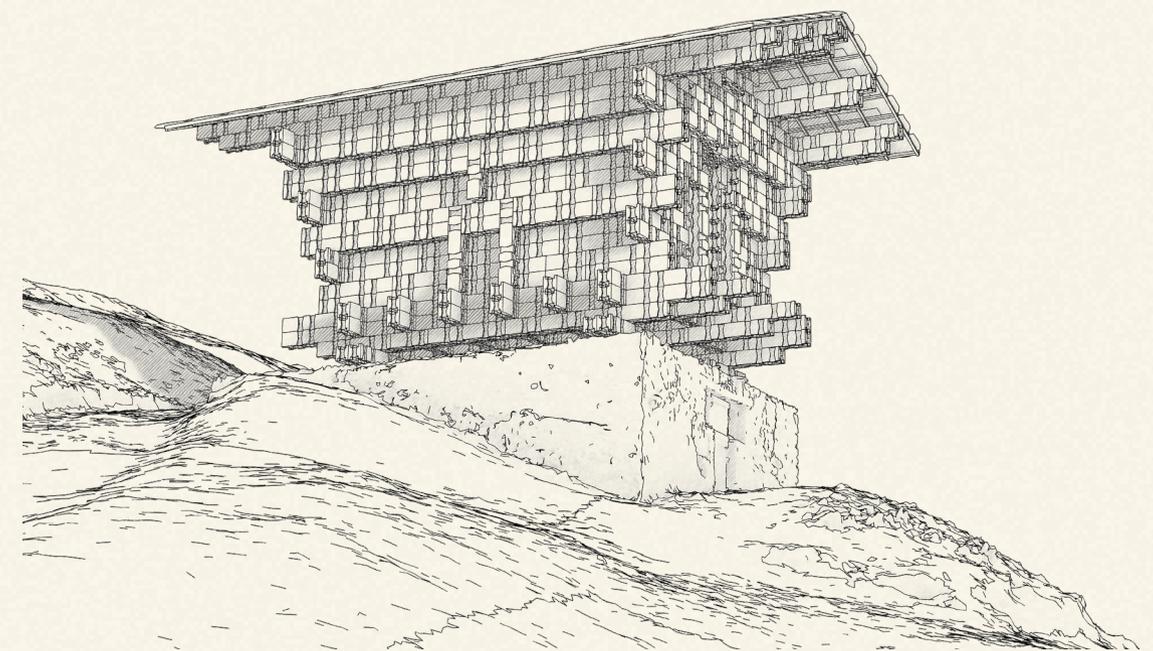
Schema di assemblaggio dei 9 componenti del sistema LokAlp Mk XII.

## 5.4 Scenari futuri

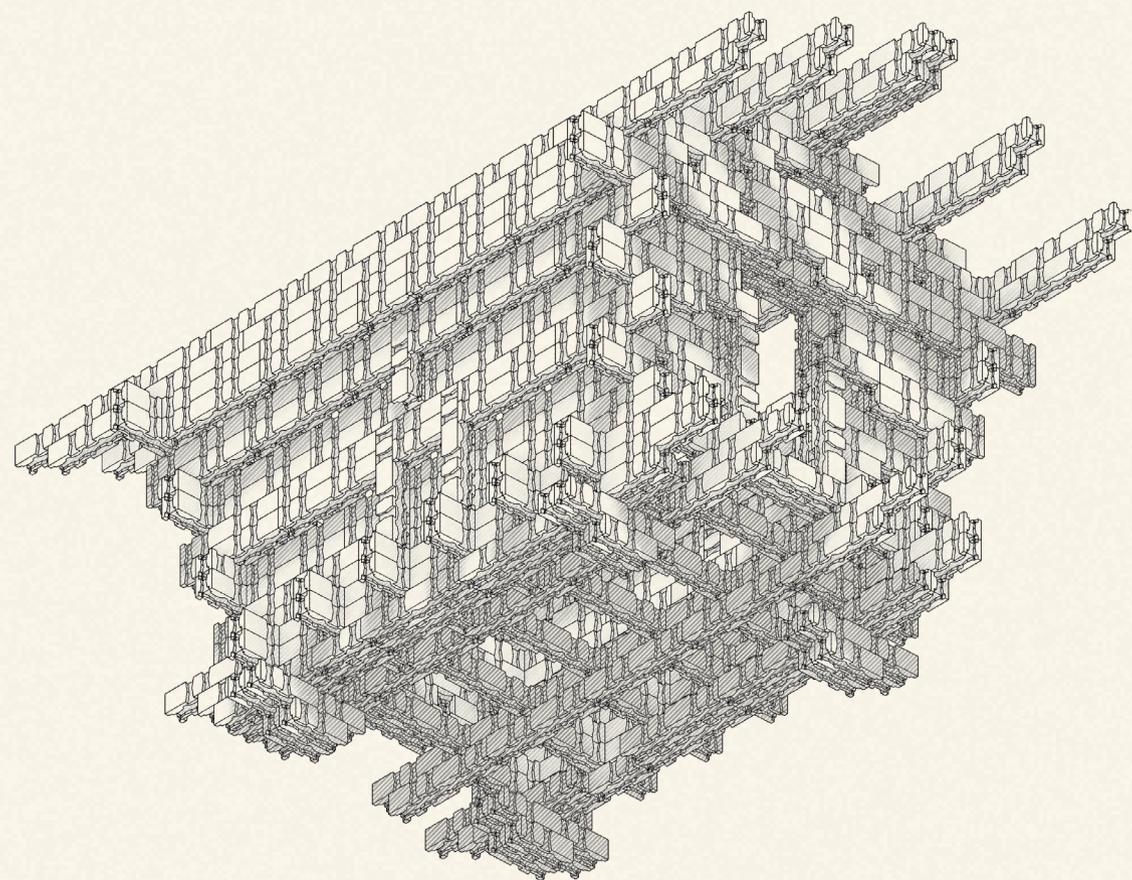
Ciò che è stato presentato sino ad ora ha avuto l'obiettivo di dimostrare la fattibilità progettuale, tecnica e strutturale del sistema costruttivo discreto LokAlp: ciononostante, il padiglione discreto esposto al SAIE 2023 aveva l'intenzionale scopo di catturare l'attenzione dei visitatori esibendo una forma particolarmente astratta, e non di mostrare quale sarebbe stata una potenziale estetica architettonica generata dal blocco LokAlp.

Come discusso nel sottocapitolo 5.2, l'idea del sistema costruttivo discreto nacque dalla volontà di voler riuscire a tradurre in termini parametrici e computazionali le conoscenze pregresse degli incastri lignei tradizionali alpini. Durante la fase di progettazione del blocco è sempre stato in mente l'obiettivo di immaginare come replicare un'architettura lignea alpina secondo i principi della progettazione discreta, andando dunque a scoprire come questo metodo

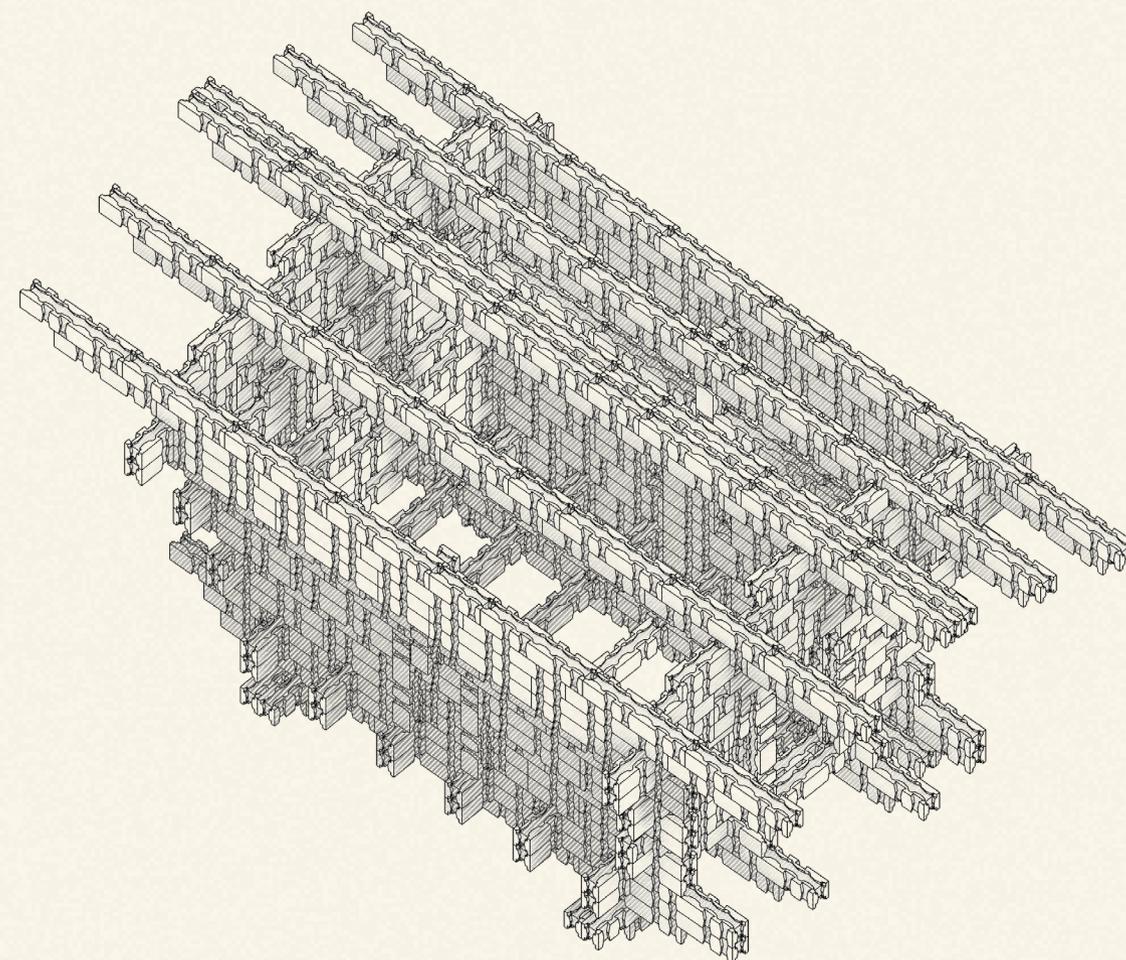
contemporaneo avrebbe riproposto in una nuova chiave l'estetica di un sistema costruttivo tradizionale ligneo. Partendo da questa ipotesi si è deciso di riproporre in chiave discreta l'architettura lignea tradizionale alpina per eccellenza, ossia il rascard: utilizzato in passato per lo stoccaggio di cereali e viveri, questa tipologia costruttiva tipicamente alpina esemplifica perfettamente il concetto di architettura blockbau, in quanto costruita esclusivamente con incastri lignei e copertura in lose. Di seguito verrà riportato dunque il rascard discreto, la riproposizione in termini contemporanei della costruzione che quasi un anno e mezzo fa mi ha ispirato dando vita a questo progetto di ricerca: il rascard Lo Naillo della Diga di Place Moulin.



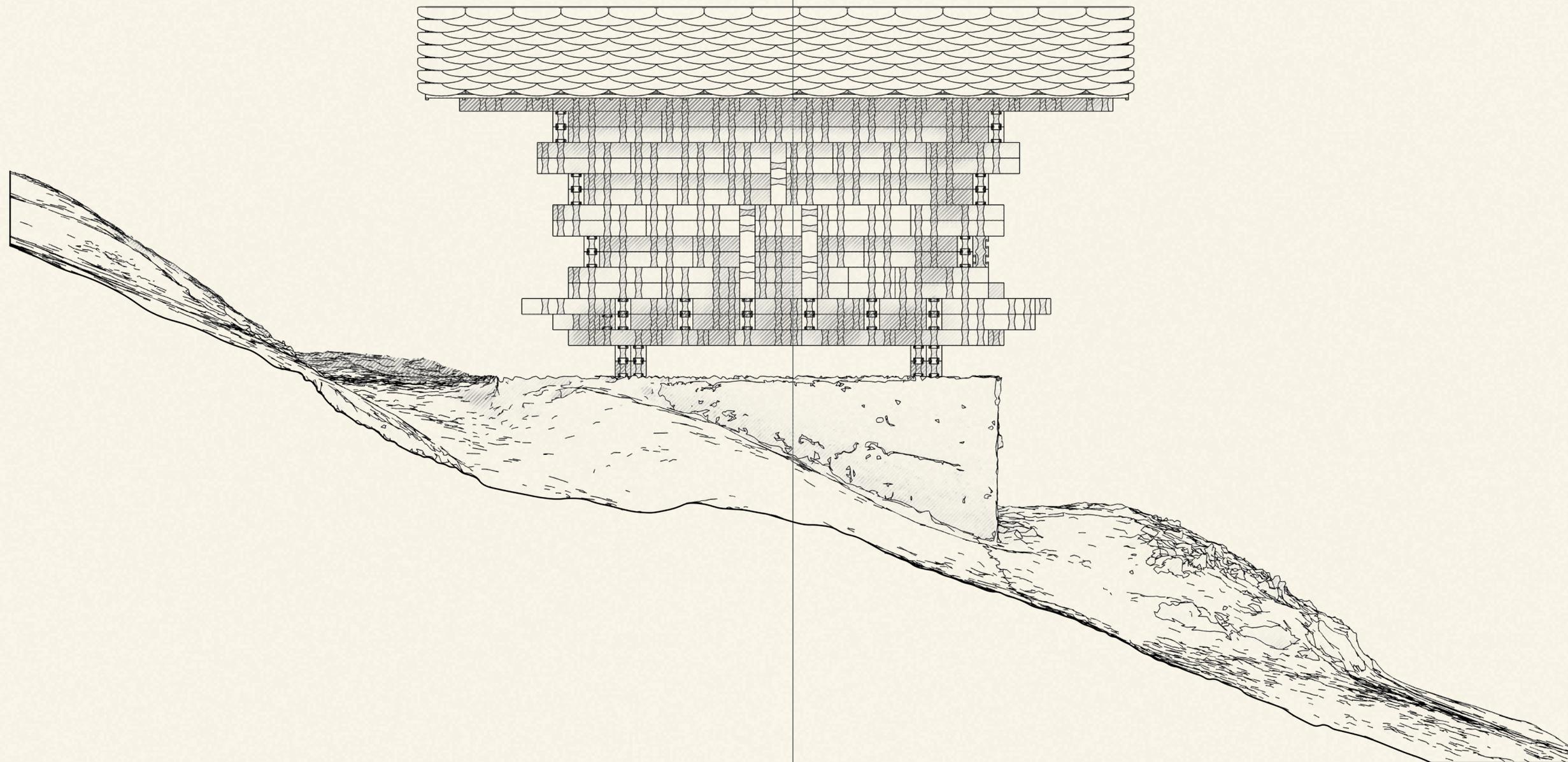
*Vista prospettica di un rascard discreto.*



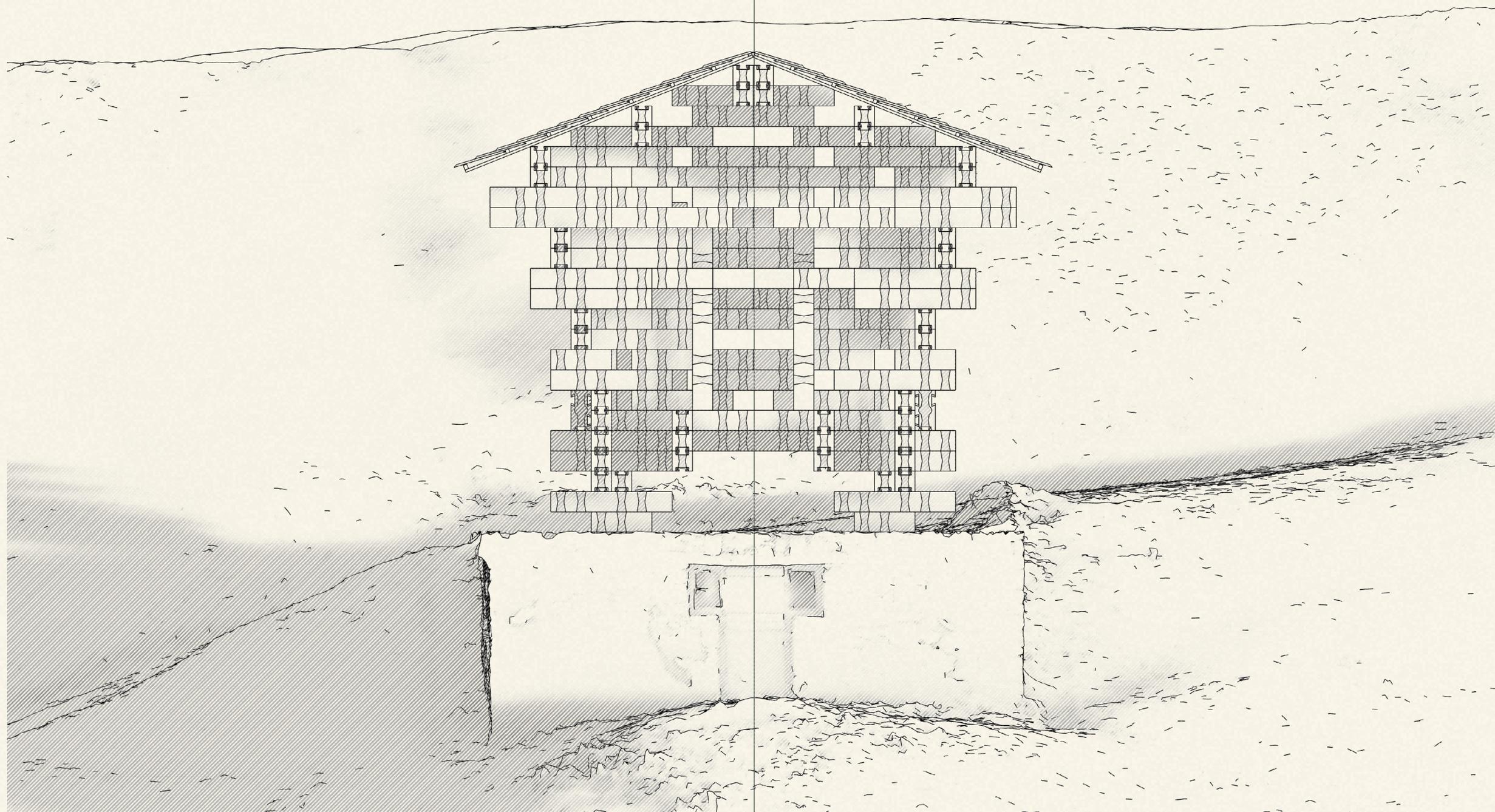
*Assonometria inferiore di un rascard discreto.*



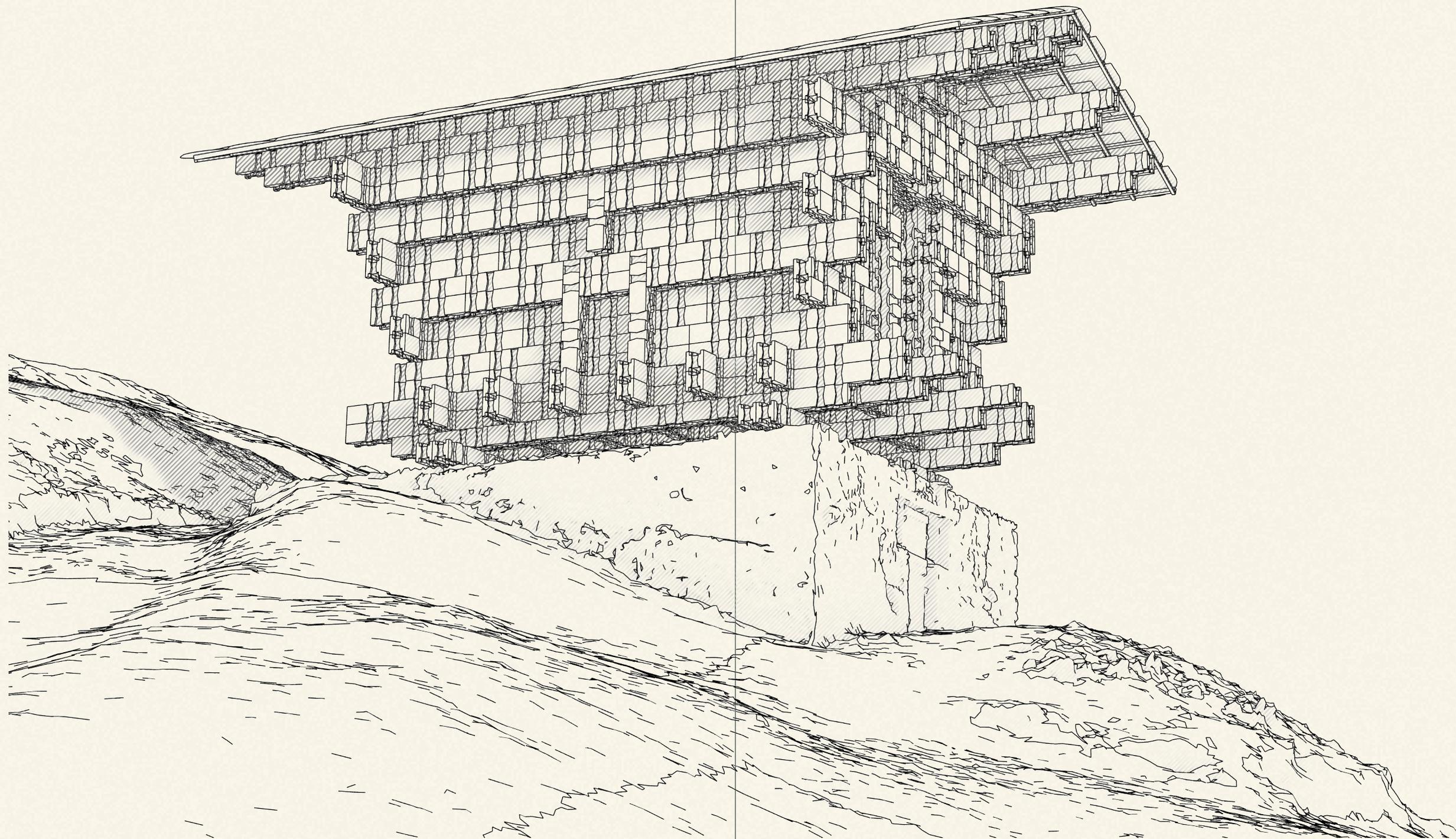
*Assonometria superiore di un rascard discreto.*



Prospetto laterale di un rascard discreto.



Prospetto frontale di un rascard discreto.



# CONCLUSIONI

L'architettura blockbau è forse il primo archetipo di metodologia costruttiva che incarna i principi dell'architettura per il riuso e anticipa in qualche maniera le caratteristiche dell'architettura discreta. La ricerca storica svolta da Hermann Phleps è stata una pietra miliare da un punto di vista tecnico-scientifico per comprendere la storia e le successive evoluzioni delle tecniche costruttive di questo sistema architettonico, evidenziando come ogni singolo dettaglio - che fosse una modanatura o l'intaglio di un incavo - fosse un tentativo per migliorare ciò che precedentemente era stato inventato, in una sorta di continua ricerca a cavallo tra la volontà di innovazione e il rispetto delle scoperte avvenute sino a quel momento. Questo percorso artigianale, susseguitosi con decine di generazioni di carpentieri nell'arco di migliaia di anni, è stato in un certo senso rimodulato con uno degli avvenimenti storici più sensazionali degli ultimi 300 anni, ossia la rivoluzione industriale. La meccanizzazione del prodotto nell'industria delle costruzioni ha portato all'abbandono graduale della produzione artigianale dei componenti costruttivi per far spazio al nuovo mondo della serialità, delle matrici e della scala-

bilità della produzione di massa: il movimento moderno ne è stato il chiaro portavoce, proponendo la trasposizione della società contemporanea in termini architettonici secondo la ripetizione degli elementi costruttivi, la scalabilità e la serialità compositiva. Questo sistema, tuttavia, nel corso dei decenni ha portato alla luce le sue limitazioni per quanto riguarda l'assenza di personalizzazione progettuale basata sulle necessità dei singoli fruitori e più in generale venendo aggredito dal cambio di paradigma del dibattito architettonico, il quale iniziò a considerare questa visione meccanicista dell'architettura troppo alienante e disumanizzante. Il movimento postmoderno espone a livello teorico queste critiche, ma di fatto il sistema industriale ed economico su cui si basava la standardizzazione del movimento moderno era tutt'altro che terminato: solamente a partire dagli anni '90 iniziarono a nascere nuove tecnologie che iniziarono a mettere seriamente in discussione, da un punto di vista economico, il vantaggio produttivo della ripetizione dei componenti. Con lo sviluppo sempre più avanzato di macchine a controllo numerico, robotica e la progettazione parametrica i componenti

unici “su misura” potevano essere finalmente prodotti su larga scala senza andare a inficiare sul costo di produzione: questa personalizzazione di ogni singolo componente ha portato ad una nuova stagione dell’architettura che ha preso il nome di architettura parametrica o continua. Grazie al controllo mirato di ogni singolo elemento, è stato possibile produrre forme senza soluzione di discontinuità, che esprimessero una fluidità e continuità di superficie senza precedenti. Questa personalizzazione di massa di ogni singolo componente ha dimostrato però nel tempo i suoi limiti intrinseci: la posizione unica predeterminata di ogni singolo elemento costruttivo – a sua volta unico per forma e dimensione – andava a compromettere le potenzialità di riutilizzo di quest’ultimo, oltre che a rendere più difficoltose le operazioni di manutenzione sostituzione in quanto componenti personalizzati su misura. Negli ultimi anni, sempre più progettisti e ricercatori hanno iniziato a indagare se fosse possibile unire due concetti sino a quel momento considerati opposti: la “standardizzazione” modernista e la “personalizzazione” parametricista. Con i crescenti interessi sempre più impellenti nei riguardi di un’economia circolare e di una vera architettura per il riuso - accostati alle recenti ricerche nel merito di componenti architettonici “universali” denominati di-

gital materials – il dibattito architettonico ha cominciato a testare innovativi sistemi di costruzione basati sulla standardizzazione di componenti universali che facilitassero la messa in opera ed al tempo stesso massimizassero le libertà compositive dei progettisti. In questo rivoluzionario ambito di ricerca, racchiuso sotto il termine di “architettura discreta”, è stato sviluppato LokAlp.

L’innovativo sistema costruttivo discreto ha basato i suoi fondamenti sulla tradizione costruttiva lignea blockbau: prendendo ad ispirazione l’evoluzione degli incastri lignei tradizionali, LokAlp ha avuto l’obiettivo di racchiudere il sapere della tradizione alpina in un innovativo blocco da costruzione che massimizasse le capacità di riuso ed al tempo stesso sfruttasse al meglio le potenzialità del design computazionale. La progettazione, produzione ed esposizione del sistema LokAlp hanno dimostrato come l’architettura discreta blockbau sia un sistema fattibile e realizzabile, confermato sia dall’investimento svolto dall’azienda partner Legno-tech che dalla brevettazione del sistema nel quadro dell’Unione Europea da parte del Politecnico di Milano.

Allo stato attuale LokAlp non è altro che ai suoi albori: sono state dimostrate a livello prototi-

pale le sue potenzialità e vantaggi da un punto di vista compositivo e tecnico-costruttivo, ma diversi temi necessitano ancora attenta ricerca in merito. Da un punto di vista strutturale è necessaria una solida integrazione con differenti software di calcolo per l’efficientamento del workflow progettuale, mentre da un punto di vista economico-produttivo è ancora da indagare più solidamente quanto il riutilizzo di scarti di carpenteria legata all’utilizzo di legno lamellare per la produzione dei blocchi possa effettivamente portare alla nascita di una filiera di fabbricazione sostenibile nel tempo.

Seppur il sistema LokAlp sia al momento ancora in fase di evoluzione, i principi dell’architettura discreta sono tutt’altro che privi di forza: gli ultimi decenni hanno dimostrato come al momento attuale l’architettura per il riuso sia ancora estremamente contenuta e poco praticata. Se si vogliono raggiungere gli obiettivi climatici e ridurre l’impronta di carbonio prodotta dal settore edilizio, il cambio di paradigma nei riguardi di un’architettura per il riuso che si basi su elementi costruttivi universali è essenziale in chiave di standardizzazione, economie di scala e personalizzazione di massa.

*“If your contribution has been vital, there will be always somebody to pick up where you left off, and that will be your claim to immortality.”*

*“Se il vostro contributo è stato vitale, ci sarà sempre qualcuno che riprenderà da dove avete lasciato, e questa sarà la vostra pretesa di immortalità.”*

*(Gropius, lettera a un gruppo di studenti, 1964.*

*Herbert 1984, p. 325)*

# BIBLIOGRAFIA

- Phleps H. (1942), *Holzbaukunst Der Blockbau*, Karlsruhe: Dr. Albert Bruder.
- Phleps H., tradotto da Roger MacGregor (1982), *The Craft of Log Building: A Handbook of Craftsmanship in Wood*, Ottawa: Lee Valley Tools.
- Leibniz G.W. (1666), *Dissertatio de Arte Combinatoria*. Lipsia.
- Cook and A. Wedderburn (2007), *The Works of John Ruskin*, London: Kessinger Publishing, p. 175.
- Carpo M (2023), *Beyond Digital: Design and automation at the end of modernity*, Massachusetts: The MIT Press.
- Ford H., Crowther S. (1923), *My Life and Work*, New York: Doubleday Page & Company, p. 72.
- *The Moving Assembly Line and the Five-Dollar Workday*, Ford Corporate. Consultato il 23 Novembre 2023. <https://corporate.ford.com/articles/history/moving-assembly-line.html>.
- Jeanneret-Gris C. É. (1923), *Vers une Architecture*, Parigi: Cres.
- Lissitzky-Küppers S. (1967), *El Lissitzky*. Londra: Tamigi e Hudson, p. 374.
- Guillén M. F (2006), *The Taylorized Beauty of the Mechanical: Scientific Management and the Rise of Modernist Architecture*, Princeton: Princeton University Press.
- Paulson W.E. (1948), *Characteristics of the Marginal Cost Curve*, *Journal of Farm Economics*, Vol. 30, No. 3, Oxford University Press, pp. 467-499.
- Leininger W.E. (1977), *Opportunity Costs: Some Definitions and Examples*, *The Accounting Review*, Vol. 52, No. 1, pp. 248-251.
- Davis S. M. (1987), *Future Perfect*, Boston: Addison Wesley.

- Carpo M. (2011), *The Alphabet and the Algorithm*, Massachusetts: The MIT Press
- Carpo M. (2012), *The Digital Turn In Architecture 1992-2012*, New York: John Wiley & Sons Inc.
- Carpo M. (2017a), *Craftmanship in the Digital Age – Architecture, Values and Digital Fabrication*, Berlin: ANCB The Aedes Metropolitan Laboratory.
- Gershenfeld N. (2012), *How to do almost anything – The digital Fabrication Revolution*, New York: Foreign affairs, v. 91, n. 6, p. 43-57
- Gramazio F (2017), *Conference The Craftmanship in the Digital Age*, Berlino: 21 Aprile.
- Oosterhuis K. (1998), *Salt Water Live, Behavior of the Salt Water Pavilion, Hypersurface Architecture*, AD Profile 133, AD 68, New York: John Wiley & Sons Ltd, pp 56-61.
- Schumacher P. (2012), *Parametricism - The Parametric Paradigm and the Formation of a New Style*, in *The Autopoiesis of Architecture*, vol. 2., Hoboken: John Wiley & Sons.
- Schumacher P. (2011), *The Autopoiesis of Architecture, Volume I: A New Framework for Architecture*, Hoboken: Wiley.
- Wolfflin H. (1961), *Renaissance and Baroque*, Itacha: Cornell University Press, p.100.
- Pottmann, H., Sigrid B., and Johannes W. (2006), *Discrete surfaces for architectural design*, In: *Curves and Surfaces: Avignon 213*, e234.
- Carpo M. (2017b), *The Second Digital Turn – Design Beyond Intelligence*, Massachusetts: The MIT Press.
- Russell A.L. (2012), *Modularity: An Interdisciplinary History of an Ordering Concept*, vol. 47, n. 3, Austin: University of Texas Press.
- Rossi A. (2023), *Mediated Assemblies – An Open Source Software Approach to Combinatorial Design and Fabrication*, Darmstadt: TU Prints.
- Alberti L.B. (1541), *De re aedificatoria libri decem*, Strasburgo: Argenterati

- excudebat M. Iacobus.
- Watkin D, Clerici R. (1999), *Storia dell'architettura occidentale*, Bologna: Zanichelli.
- Jesse C. and Rourke W. (2001), *The Crystal Palace*. Consultato il 26 Novembre 2023. <http://www2.iath.virginia.edu/london/model/geo.html>.
- Addis B. (2006), *The Crystal Palace and its place in structural history*, *International journal of space structures*, Londra: SAGE Publications Sage, pp. 3-19.
- Bemis A.F (1936), *The Evolving House*, vol. 3, Rationalisation. Massachusetts: The MIT Press.
- Hobsbawm E. J. (1995), *Il Secolo Breve 1914-1991: l'era dei grandi cataclismi*, Milano: Rizzoli.
- Gropius W. (1922), *Wohnmaschinen*, manoscritto non pubblicato datato 6 Febbraio 1922. Cambridge: Gropius Archive, Houghton Library, vol. 19, pp. 3-6.
- Noschka A and Günter K. (1986), *Bauklötze staunen. Zweihundert Jahre Geschichte der Baukästen*. Monaco: Hirmer, pp. 51-61.
- Nerdinger W. (1985), *Der Architekt Walter Gropius. The Architect Walter Gropius*. Berlino: Gebr. Mann Verlag, pp. 66-67.
- Gropius W. (1925), *Wohnhaus-Industrie, in Ein Versuchshaus des Bauhauses in Weimar – Bauhausbücher*, Monaco: A. Langen, pp. 8-11.
- Herbert G. (1984), *The dream of the factory-made house: Walter Gropius and Konrad Wachsmann*, Massachusetts: The MIT Press.
- Seelow A.T. (2018), *The Construction Kit and the Assembly Line—Walter Gropius' Concepts for Rationalizing Architecture*, n. 4: 95.
- Carreiro J. et. Al. (1968), *The new building block: A report on the factory-produced dwelling module*, Ithaca: Cornell University Press.
- Gropius W. and Gropius I. (1968), *Apollo in the Democracy: the Cultural Obligation of the Architect*, New York: McGraw-Hill.

- Malaia K. (2020), A Unit of Homemaking: The Prefabricated Panel and Domestic Architecture in the Late Soviet Union, in: *Architectural Histories* 8.1, 28 Settembre 2020, p. 12.
- Oshima K. T. and Waern R. (2008), Home delivery: fabricating the modern dwelling, New York: The Museum of Modern Art, pp. 144-147.
- Ward J. (2010), Additive assembly of digital materials, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Gershenfeld N., Gershenfeld A. and Cutcher-Gershenfeld J. (2017), *Designing reality: How to survive and thrive in the third digital revolution*, New York: Basic Books, pp. 106-110.
- Retsin G. (2019), Discrete – Reappraising the Digital in Architecture, *Architectural Design*, vol. 89, n. 2, New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Remacle C. (2014), *Architettura in legno in Valle d'Aosta*, Soprintendenza per i Beni e le Attività Culturali, Aosta: Tipografia Duc, p.385.
- Pulz D. (2011), *La Valpelline e la diga di Place-Moulin*, Aosta: Le Château Edizioni, pp. 79-83.
- Commissione Europea (2019), The European Green Deal, Comunicazione della commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni, Bruxelles: 11 dicembre 2019.
- Commissione Europea (2022), Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL laying down harmonised conditions for the marketing of construction products, amending Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Regulation (EU) 305/2011, Bruxelles: 30 marzo 2022.
- Fairs M. (2021), Six examples of reversible architecture and design that can be taken apart and repurposed, *Dezeen*: 11 gennaio 2021.
- Griffiths A. (2021), Triodos Bank is a reversible timber-framed office nestled in Dutch woodland, *Dezeen*: 21 febbraio 2021.
- European Circular Economy Stakeholder Platform (2021) *Circular Buildings*

and infrastructure, State of play report ECESP leadership group on buildings and infrastructure, p. 21.

- Robeller C. & Haaren N. Niklas (2020), Recycleshell: Wood-Only Shell Structures Made from Cross-Laminated Timber (CLT) Production Waste, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*.
- European Patent Office (2024). Consultato il 3 Gennaio 2024. <https://www.epo.org/en/new-to-patents/is-it-patentable>
- Jessee C. and Rourk W. (2001), The Crystal Palace. Consultato il 26 Novembre 2023. <http://www2.iath.virginia.edu/london/model/geo.html>.
- European Patent Office (2023) Consultato il 3 Gennaio 2024. <https://www.epo.org/en/news-events/press-centre/press-release/2023/740248>
- Ufficio dell'Unione europea per la proprietà intellettuale (2023a). Consultato il 3 Gennaio 2024. <https://guidelines.euipo.europa.eu/2058430/1802350/direttive-di-disegni-e-modelli/4-1-conformita-alla-definizione-di-disegno-o-modello>
- Ufficio dell'Unione europea per la proprietà intellettuale (2023b). Consultato il 3 Gennaio 2024. <https://www.euipo.europa.eu/it/designs/before-applying/locarno-classification>
- DesignView (2024) . Consultato il 3 Gennaio 2024 <https://www.tmdn.org/tmdsview-webdsviresults?page=1&pageSize=20&criteria=W&indicationOfProduct=construction%2Bmodules&sortColumn=applicationDate&desc=true&fLocarnoClass=25.02>
- eSearchPlus (2024). Consultato il 3 Gennaio 2024. <https://euipo.europa.eu/eSearch/#basic/1+1+1+1/100+100+100+100/015040194>
- Rossi A. e Tessmann O. (2019), Geometry as Interface - Parametric and Combinatorial Topological Interlocking Assemblies, *Journal of Applied Mechanics*, vol. 86, p. 7.
- Brunés T. e Napier C. (1967), *The Secrets of Ancient Geometry and its uses*, Volume I, Copenhagen: Rhodos International Science, p. 304.
- Berlyn P. e Fowler C. (1851), *The Crystal palace, its architectural history and constructive marvels*, Londra: J. Gilbert, p. 68.

# LISTA IMMAGINI

— PaulGettyMuseum - <a href="https://www.getty.edu/art/collection/object/105SWY#full-artwork-details">https://www.getty.edu/art/collection/object/105SWY#full-artwork-details</a> . . . . .	56
— Harry Ransom Center - <a href="https://www.hrc.utexas.edu/gutenberg-bible/">https://www.hrc.utexas.edu/gutenberg-bible/</a> . . . . .	57
— Detroit Public Library - <a href="https://digitalcollections.detroitpubliclibrary.org/islandora/object/islandora%3A153404">https://digitalcollections.detroitpubliclibrary.org/islandora/object/islandora%3A153404</a> . . . . .	60
— Local of Congress - <a href="https://digitalcollections.detroitpubliclibrary.org/islandora/object/islandora%3A153404">https://digitalcollections.detroitpubliclibrary.org/islandora/object/islandora%3A153404</a> . . . . .	61
— Fondation Le Corbusier - <a href="https://www.fondationlecorbusier.fr/oeuvre-architecture/projets-maison-citrohan-sans-lieu-1922/">https://www.fondationlecorbusier.fr/oeuvre-architecture/projets-maison-citrohan-sans-lieu-1922/</a> . . . . .	63
— Archivio di Stato russo per la letteratura e l'arte, Mosca - <a href="https://www.moma.org/interactives/objectphoto/assets/essays/Gough.pdf">https://www.moma.org/interactives/objectphoto/assets/essays/Gough.pdf</a> . . . . .	65
— TheWolfsonianMuseum - <a href="https://digital.wolfsonian.org/WOLF058765?search_api_fulltext=thonet">https://digital.wolfsonian.org/WOLF058765?search_api_fulltext=thonet</a> . . . . .	66
— Globe Parlor Furniture Company - <a href="https://archive.org/details/GlobeParlorFurniture0001/page/n19/mode/2up">https://archive.org/details/GlobeParlorFurniture0001/page/n19/mode/2up</a> . . . . .	66
— Domus - <a href="https://www.domusweb.it/en/from-the-archive/2018/02/13/mies-in-berlin.html">https://www.domusweb.it/en/from-the-archive/2018/02/13/mies-in-berlin.html</a> . . . . .	74
— Studio RAP - <a href="https://studiorap.nl/Skilled-in">https://studiorap.nl/Skilled-in</a> . . . . .	75
— Staatliche Museen zu Berlin - <a href="https://blog.smb.museum/optisch-gerade-aber-doch-gebogen-das-dach-der-neuen-nationalgalerie/">https://blog.smb.museum/optisch-gerade-aber-doch-gebogen-das-dach-der-neuen-nationalgalerie/</a> . . . . .	76
— Studio RAP - <a href="https://studiorap.nl/Skilled-in">https://studiorap.nl/Skilled-in</a> . . . . .	77
— Artribune - <a href="https://www.artribune.com/progettazione/architettura/2021/05/riapre-la-neue-nationalgalerie/">https://www.artribune.com/progettazione/architettura/2021/05/riapre-la-neue-nationalgalerie/</a> . . . . .	78
— Studio RAP - <a href="https://studiorap.nl/Skilled-in">https://studiorap.nl/Skilled-in</a> . . . . .	79
— Scientific American - <a href="https://www.jstor.org/stable/24950784">https://www.jstor.org/stable/24950784</a> . . . . .	83
— Scientific American - <a href="https://www.jstor.org/stable/24950784">https://www.jstor.org/stable/24950784</a> . . . . .	84

— Gramazio Kohler Architects - <a href="https://www.gramaziokohler.com/web/d/bauten/25.html">https://www.gramaziokohler.com/web/d/bauten/25.html</a> . . . . .	87
— Casabella - <a href="https://casabellaweb.eu/2015/03/11/frei-otto-1925-2015/">https://casabellaweb.eu/2015/03/11/frei-otto-1925-2015/</a> . . . . .	92
— Ezra Stoller Photographer - <a href="https://www.ezrastoller.com/new-gallery-1">https://www.ezrastoller.com/new-gallery-1</a> . . . . .	95
— Chora Projects - <a href="https://choraprojects.it/category/arte/">https://choraprojects.it/category/arte/</a> <a href="https://choraprojects.it/category/arte/">https://choraprojects.it/category/arte/</a> . . . . .	98
— Brooke Bbuchanan photographer - <a href="https://www.brookebbuchanan.com/petra-facades">https://www.brookebbuchanan.com/petra-facades</a> . . . . .	99
— Zaha Hadid Architects - <a href="https://www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliev-centre/">https://www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliev-centre/</a> . . . . .	102
— Zaha Hadid Architects - <a href="https://www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliev-centre/">https://www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliev-centre/</a> . . . . .	103
— Compagnie de chemin de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée - <a href="https://wikiplm.railsdautrefois.fr/wikiPLM/index.php/Photos_ou_cartes_postales_des_b%C3%A2timents_de_la_gare_de_Paris-Gare-de-Lyon_de_1895">https://wikiplm.railsdautrefois.fr/wikiPLM/index.php/Photos_ou_cartes_postales_des_b%C3%A2timents_de_la_gare_de_Paris-Gare-de-Lyon_de_1895</a> . . . . .	111
— The Evolving House - <a href="http://www.survivorlibrary.com/library/the_evolving_house_volume_iii_rational_design_1936.pdf">http://www.survivorlibrary.com/library/the_evolving_house_volume_iii_rational_design_1936.pdf</a> . . . . .	112
— The Evolving House - <a href="http://www.survivorlibrary.com/library/the_evolving_house_volume_iii_rational_design_1936.pdf">http://www.survivorlibrary.com/library/the_evolving_house_volume_iii_rational_design_1936.pdf</a> . . . . .	114
— Topographisch-statistischer Schematismus des Grossgrundbesitzes im Königreiche Böhmen - <a href="https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=njp.32101045280508&amp;seq=834">https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=njp.32101045280508&amp;seq=834</a> . . . . .	116
— The Country Gentleman - <a href="https://www.flickr.com/photos/dok1/15276293706/in/photostream/">https://www.flickr.com/photos/dok1/15276293706/in/photostream/</a> . . . . .	125
— Domus - <a href="https://www.domusweb.it/en/news/2021/07/02/nakagin-capsule-tower-at-risk-of-demolition.html">https://www.domusweb.it/en/news/2021/07/02/nakagin-capsule-tower-at-risk-of-demolition.html</a> . . . . .	126
— Garner 1996 - <a href="https://archive.org/details/sixtiesdesign0000garn/page/n7/mode/2up">https://archive.org/details/sixtiesdesign0000garn/page/n7/mode/2up</a> . . . . .	129
— Gilles Retsin - <a href="https://www.retsin.org/Tallinn-Architecture-Biennale-Pavilion">https://www.retsin.org/Tallinn-Architecture-Biennale-Pavilion</a> . . . . .	145
— Gilles Retsin - <a href="https://www.retsin.org/Tallinn-Architecture-Biennale-Pavilion">https://www.retsin.org/Tallinn-Architecture-Biennale-Pavilion</a> . . . . .	146

— Gilles Retsin - <a href="https://www.retsin.org/Tallinn-Architecture-Biennale-Pavilion">https://www.retsin.org/Tallinn-Architecture-Biennale-Pavilion</a> . . . . .	147
— Kengo Kuma Associates - <a href="https://kkaa.co.jp/en/project/kodama/">https://kkaa.co.jp/en/project/kodama/</a> . . . . .	148
— Kengo Kuma Associates - <a href="https://kkaa.co.jp/en/project/kodama/">https://kkaa.co.jp/en/project/kodama/</a> . . . . .	149
— Kengo Kuma Associates - <a href="https://kkaa.co.jp/en/project/gc-prostho-museum-research-center/">https://kkaa.co.jp/en/project/gc-prostho-museum-research-center/</a> . . . . .	150
— Kengo Kuma Associates - <a href="https://kkaa.co.jp/en/project/gc-prostho-museum-research-center/">https://kkaa.co.jp/en/project/gc-prostho-museum-research-center/</a> . . . . .	151
— Gilles Retsin - <a href="https://www.retsin.org/Nuremberg-Concert-Hall">https://www.retsin.org/Nuremberg-Concert-Hall</a> . . . . .	152
— Gilles Retsin - <a href="https://www.retsin.org/Diamonds">https://www.retsin.org/Diamonds</a> . . . . .	154
— Gilles Retsin - <a href="https://www.retsin.org/Blokhut">https://www.retsin.org/Blokhut</a> . . . . .	155
— Dezeen - <a href="https://www.dezeen.com/2018/12/09/noa-zallinger-alpine-retreat-wooden-chalets-italy-architecture/">https://www.dezeen.com/2018/12/09/noa-zallinger-alpine-retreat-wooden-chalets-italy-architecture/</a> . . . . .	168
— Dezeen - <a href="https://www.dezeen.com/2018/12/09/noa-zallinger-alpine-retreat-wooden-chalets-italy-architecture/">https://www.dezeen.com/2018/12/09/noa-zallinger-alpine-retreat-wooden-chalets-italy-architecture/</a> . . . . .	169
— Egger - <a href="https://andreasegger.ch/projekte/sommeratelier-peist">https://andreasegger.ch/projekte/sommeratelier-peist</a> . . . . .	172
— Egger - <a href="https://andreasegger.ch/projekte/sommeratelier-peist">https://andreasegger.ch/projekte/sommeratelier-peist</a> . . . . .	173
— Giubbini - <a href="https://www.giubbini.ch/bauten/mottahutte">https://www.giubbini.ch/bauten/mottahutte</a> . . . . .	176
— Giubbini - <a href="https://www.giubbini.ch/bauten/mottahutte">https://www.giubbini.ch/bauten/mottahutte</a> . . . . .	177
— ABB Group - <a href="https://librarye.abb.com/public/644368927a564be7a2b7908640cb5eb2/3HAC080366%20PS%20IRB%204600%20on%20OmniCore-en.pdf">https://librarye.abb.com/public/644368927a564be7a2b7908640cb5eb2/3HAC080366%20PS%20IRB%204600%20on%20OmniCore-en.pdf</a> . . . . .	231
— ABB Group - <a href="https://librarye.abb.com/public/644368927a564be7a2b7908640cb5eb2/3HAC080366%20PS%20IRB%204600%20on%20OmniCore-en.pdf">https://librarye.abb.com/public/644368927a564be7a2b7908640cb5eb2/3HAC080366%20PS%20IRB%204600%20on%20OmniCore-en.pdf</a> . . . . .	232

# RINGRAZIAMENTI

Scrivere i ringraziamenti in qualche maniera mi imbarazza ma a quanto pare sembrano obbligatori a livello morale, quindi eccoci qua.

Ringrazio mamma e papà per tutto quello che mi hanno dato, questo piccolo libro non esisterebbe grazie a loro e questa tesi è stata scritta sempre con l'obiettivo di fondo di produrre un bel libro che potessero sfogliare. So che non ci capirete nulla ma so anche che ne siete estremamente fieri. Questa tesi è più per voi che per me. Grazie anche a Dodi, forse una delle poche persone che leggerà per davvero tutto questo.

Ringrazio chiaramente la mia relatrice Roberta, che è stata l'unica professoressa a credere nella mia mezza follia di idea, mettendo la firma sulla candidatura di tesi all'estero senza che io ancora avessi il tema in mente: "tu vai a Rotterdam, e sono certa che troverai il tema che ti farà innamorare", aveva ragione.

Ringrazio di aver conosciuto il mio relatore Pierpaolo. Dieci pagine di ringraziamenti per lui non basterebbero. Si è fidato di un perfetto sconosciuto che lo ha chiamato da Rotterdam proponendo-

gli una tesi e nella stessa chiamata ha detto "se tutto va nei tempi previsti, potremmo pure esporlo a ottobre". E così è stato. È merito suo di avermi dato la possibilità di produrre il blocco, esporre alla più grande fiera delle costruzioni, brevettare il sistema. E soprattutto, a insegnarmi che il piano A non funziona mai: se continuerò il percorso di ricerca in Italia sarà solamente perché c'è lui.

Agradeço à minha Fofinha, che ha visto nascere, crescere e concludere questo progetto; è stata più entusiasta di me nel vedere la mia tesi crearsi (manco io ho pianto per la mia tesi) ed è stata la più grande cheerleader di questo progetto. Grazie a lei che ha trovato la gemma della ricerca di Phleps, l'irreprensibile "nazi book" che ha dato inizio a questa tesi.

Ringrazio Stefano e Giada solo se anche voi mi ringraziate nella tesi (Giulio: sei già fuori). Scherzo, grazie Giada che mi hai trovato lavoro e fidanzata. Stefano non si può non ringraziare. Ringrazio tutti i miei colleghi e amiketti? Ma si dai perché no, le cene a casa erano proprio belline.

Grazie anche a te, Marco.