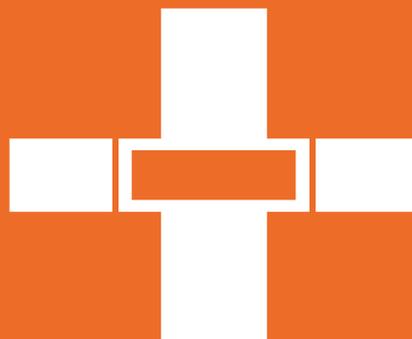
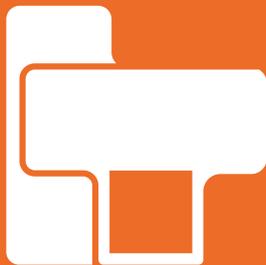
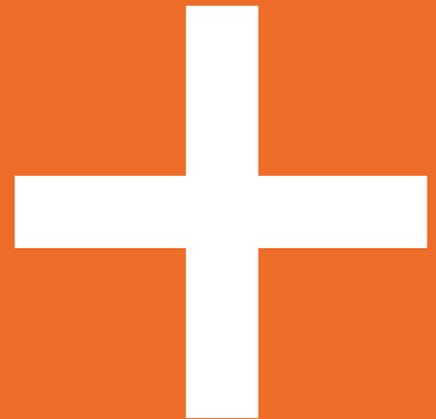
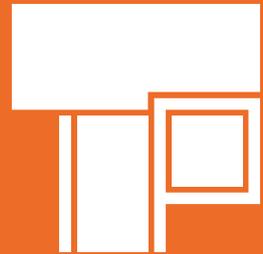
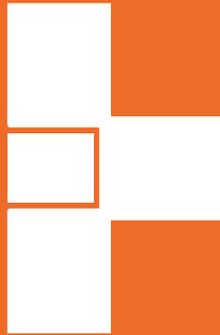


Design del giunto fai da te nell'era digitale



Candidati
Daide Bersia
Lorenzo Chiattone

Relatore
Prof. Claudio Germak

Co-relatore
Stefano Gabbatore





**Politecnico
di Torino**

Il design del giunto fai da te nell'era digitale

Politecnico di Torino
DAD - Dipartimento di Architettura e Design
Design e Comunicazione
A.A. 2024/2025

Sessione di Laurea Febbraio 2025

Candidati

Davide Bersia
Lorenzo Chiattono

Relatore

Prof. Claudio Germak

Co-relatore

Stefano Gabbatore

Indice

1. Introduzione	8	4.8 AM domestico: la stampa 3D	118
1.1 Gli obiettivi	10	4.9 Le dimensioni	124
1.2 L'autocostruzione e il progetto open source	12	4.10 Le applicazioni	128
1.3 Il giunto: un'alchimia tra ingegno, struttura e poetica	14		
1.4 Innovazione tecnologica e formale	16		
1.5 Perché lo scaffale come oggetto-laboratorio?	18		
		5. Il Generative Design	132
2. L'autoproduzione	20	5.1 Che cos'è	134
2.1 Il fai da te	22	5.2 La storia	140
2.2 La diffusione	24	5.3 Generative Design e Additive Manufacturing	142
2.3 Le nuove tendenze	32	5.4 Generative Design e Ottimizzazione Topologica	144
2.4 L'accessibilità alle nuove tecnologie	34	5.5 Generative Design e Design Parametrico	146
2.5 L'open source	36	5.6 Strumenti per il Generative Design	148
2.6 Le criticità del fai da te	38	5.7 Le fasi della progettazione generativa	150
		5.8 Vantaggi e svantaggi	162
		5.9 Le applicazioni	164
		6. Le scaffalature	168
3. Il giunto per forma	42	6.1 Lo scaffale	170
3.1 Che cos'è	44	6.2 Classificazione delle scaffalature	172
3.2 Che cosa non è	46	6.3 L'evoluzione storica dello scaffale	176
3.3 La poetica della connessione	48	6.4 Le connessioni nelle scaffalature	184
3.4 Le origini del giunto per forma	50		
3.5 Classificazione dei giunti per forma	52		
3.6 Una pratica sostenibile	58	7. La sperimentazione progettuale	202
3.7 Le nuove prospettive	60	7.1 I requisiti	204
		7.2	208
4. L'Additive Manufacturing	76	7.3 La scelta dei componenti	210
4.1 Che cos'è	78	7.4 Il concept e le sue declinazioni	220
4.2 La storia	82	7.5 La verifica strutturale	226
4.3 Le fasi	84	7.6 La progettazione generativa	242
4.4 Tecniche esistenti	96	7.7 Prototipazione dei giunti	282
4.5 I materiali	100	7.8 Considerazioni finali, o di partenza?	298
4.6 Design per l'AM	106		
4.7 Vantaggi e svantaggi	108	Bibliografia	304

Introduzione

La progettazione è un processo antico quanto l'ingegno umano: ha permesso lo sviluppo di civiltà, architetture, macchine e strumenti che hanno modellato la nostra esistenza. Con l'avvento delle tecnologie digitali, si è aperta una nuova era per il design e la fabbricazione, un'era in cui direttamente nelle case delle persone è possibile concepire e realizzare forme impensabili fino a qualche decennio fa. Questa tesi esplora un tema specifico all'interno di questo vasto ambito: la progettazione e realizzazione di giunti per forma, applicati a una scaffalatura archetipa, sfruttando le potenzialità della prototipazione rapida FDM (Fused Deposition Modeling). L'obiettivo principale di questa ricerca sperimentale è creare una soluzione che sia flessibile, accessibile e orientata all'autocostruzione, in linea con i principi dell'open source e della sostenibilità.



1.1 Gli obiettivi

Il design e la progettazione di elementi d'arredo sono discipline che combinano creatività, funzionalità e tecnologia. In questo contesto, la tesi ha come obiettivo quello di esplorare l'applicazione della fabbricazione additiva per la realizzazione di giunti per forma¹, testati e valutati attraverso l'assemblaggio di una scaffalatura archetipa. Il risultato atteso è trovare delle giunture versatili in grado di connettere piani, aste o entrambi, realizzate tramite tecnologie di stampa 3D a filo caldo (FDM)². Il prodotto è concepito per un mercato open source, in cui l'utente può scaricare il modello digitale del giunto per stamparlo autonomamente a casa. Oltre a concentrarsi sull'aspetto formale per identificare lo stile espressivo dei giunti, l'aspetto progettuale dell'elaborato verte sull'identificazione del corretto materiale in termini di stampabilità, prestazioni e accessibilità, nonché un'analisi strutturale dei giunti. Questa ricerca sperimentale mira dunque a promuovere un design modulare e accessibile, incentivando la personalizzazione e la sostenibilità del prodotto, sfruttando le nuove frontiere nel campo dell'autocostruzione, del progetto open source e della prototipazione rapida, tenendo pur sempre conto della diffusione ancora relativamente limitata di queste tecnologie e del loro costo attualmente poco competitivo se approcciate tramite servizi esterni.

1. Metodo di giunzione che si basa sull'assemblaggio stabile di componenti sfruttando le loro geometrie e le proprietà dei loro materiali.

2. Acronimo di "Fused Deposition Modelling". È la tecnica di stampa 3D più diffusa e accessibile, che si basa sull'estrusione di un filamento di materiale termoplastico, che viene riscaldato e depositato strato per strato [1].

Figura 1.1
Autoproduzione di oggetti tramite stampa 3D [2].



1.2 L'autoproduzione e il progetto open source

L'aspetto chiave di questa ricerca, oltre alla progettazione dei giunti, è l'enfasi sull'autoproduzione e sull'approccio open source al progetto. Rendere l'utente parte integrante del processo di costruzione non solo riduce i costi di produzione, ma aumenta il valore percepito del prodotto finale. Inoltre, la partecipazione attiva dell'utente favorisce un maggiore legame affettivo con l'oggetto, poiché quest'ultimo diventa il frutto di un processo collaborativo e personalizzato.

Per rendere questo possibile, si è scelto di progettare giunti che non richiedano lavorazioni aggiuntive ai piani, alle aste o al giunto stesso. Le giunture sono pensate per essere stampate in 3D e montate direttamente sulla struttura, garantendo un processo semplice e alla portata di tutti. Questa soluzione favorisce una maggiore accessibilità, eliminando la necessità di attrezzature o competenze avanzate.



Figura 1.2
Misurazione di un asse
di legno per attività di
fai da te [3].

1.3 Il giunto: un'alchimia tra ingegno, struttura e poetica

Nella prefazione di una recente (e colossale per dimensione) opera successiva alla Mostra «U-Joints. A taxonomy of connections» [4] gli autori si domandano che cosa sia per la progettazione un giunto e a quali connessioni possa dare vita. Secondo una comune definizione è una soluzione per unire due o più parti, a cui si aggiungono altri indizi: che il giunto può essere statico o dinamico, essere reversibile o irreversibile, essere a vista o nascosto, costituire un accessorio oppure essere ricavato dalla lavorazione delle parti da unire. Ma non sono questi parametri oggettivi che definiscono un giunto. Da un punto di vista soggettivo, il giunto può essere il risultato di uno studio più o meno ingegnoso ed essere pensato per avere una determinata identità espressiva, passando quindi da dettaglio a protagonista della composizione. Non a caso, «Il diavolo è nei dettagli» era un modo proverbiale per dire quale fatica progettuale fosse richiesta nell'affrontare la dimensione del dettaglio; a cui fece eco «Dio è nei dettagli» con cui Mies Van de Rohe rafforza tale concetto [5].

Più il giunto diventava espressione formale oltre che meccanica, più andava affermandosi la ricerca per la minimalità delle connessioni come osservò Bruno Munari. Parimenti, l'attenzione verso le giunzioni cresceva con l'affermarsi della produzione edilizia industrializzata, attraverso l'impiego di materiali diversi come il calcestruzzo armato, l'acciaio, l'alluminio e il legno. Non solo. Molti architetti e ingegneri spingono l'acceleratore sulla possibilità che un giunto possa essere universale, con la capacità di unire due o più elementi di diversa forma e dimensione [6]. In realtà questo non avvenne se non in qualche rara sperimentazione, proprio per il fatto che alcuni parametri, di statica, di materiale e di forma in qualche modo devono essere definiti. Si affermano invece le connessioni a sistema, dove il giunto connette in diverse direzioni, con una dimensione che può essere scalata sulla base degli elementi che deve sopportare. Tanti noti protagonisti dell'architettura sono coinvolti in questa avventura: da Gropius a Fuller, da Mies a Wachsmann, fino a Blaser, Mangiarotti, Mari.

Figura 1.3
Modos Furniture, sistema di mobili modulari basati su un connettore metallico che lavora per forma [7].



1.4 Innovazione tecnologica e formale

La scelta della tecnologia di stampa a filo caldo è motivata dalla sua ampia diffusione e accessibilità, sia in termini di macchine di stampa che di materiali disponibili. La tecnologia FDM permette di ottenere componenti con un buon rapporto qualità-prezzo, adatti a un pubblico ampio e variegato. La scelta del materiale più opportuno rappresenta inoltre uno step cruciale per assicurare la stampabilità e la funzionalità strutturale dei giunti, senza compromettere la loro sostenibilità ambientale e accessibilità.

Per lo studio delle forme è stata esplorata l'applicazione del generative design³. Questo metodo di progettazione consente di creare geometrie non convenzionali, in cui il materiale è distribuito esclusivamente nei punti necessari per soddisfare i requisiti di resistenza strutturale. L'uso del generative design, combinato all'additive manufacturing⁴, può dunque rappresentare un'esplorazione di nuovi linguaggi estetici, ampliando le possibilità espressive e massimizzando il risparmio materico.

3. Tecniche di progettazione basate su algoritmi che generano automaticamente soluzioni ottimali basate su vincoli e parametri definiti [8].

4. Insieme di tecnologie di produzione in cui gli oggetti vengono realizzati aggiungendo materiale strato dopo strato [9].



Figura 1.4
Cell Cycle, anello in acciaio inossidabile con struttura realizzata con il generative design e stampata in 3D, Nervous System, 2012 [10].

1.5 Perché lo scaffale come oggetto-laboratorio?

Sarebbe interessante rispondere a questa domanda con le parole di Bruno Munari ed Ettore Sottsass, che dissero: "ci sono più sedie che culi [11]", sottolineando come il design di certi oggetti sia ormai inflazionato e talvolta privo di reale innovazione. La realtà però è ben diversa. Il fine di questa ricerca non è progettare uno scaffale, ma sfruttarlo come mezzo per approfondire lo studio e la sperimentazione dei giunti per forma come soluzione tecnica e funzionale. Lo scaffale, infatti, è una struttura essenziale e versatile che si presta perfettamente all'analisi delle connessioni tridimensionali. La scaffalatura rappresenta infatti una struttura geometrica essenziale, uno scheletro che, per i progettisti, da sempre rappresenta la perfetta palestra per lo studio e la progettazione dei giunti. Inoltre, rispetto ad altri mobili, lo scaffale presenta caratteristiche uniche: consente di osservare i giunti sia dall'alto, per i piani inferiori, sia dal basso, per i piani superiori, offrendo una visibilità completa delle connessioni. Inoltre, lo scaffale è un prodotto composto da un insieme di elementi geometrici di base, come aste e piani, che lo rendono particolarmente adatto per testare e applicare connessioni per forma. La sua struttura modulare e tridimensionale permette di sperimentare soluzioni innovative che massimizzano la funzionalità dei giunti progettati, garantendo al contempo semplicità e accessibilità nella realizzazione.



Figura 1.5
Scaffalatura a parete posta in un soggiorno [12].

L'autoproduzione

Oltre agli aspetti pratici ed estetici, l'autoproduzione ha un significato culturale profondo. È un modo per preservare e tramandare competenze tradizionali, ma anche per adattarle alle esigenze e alle tecnologie moderne. In un'epoca di crescente automatizzazione e produzione di massa, il fai da te rappresenta una forma di resistenza, un richiamo alla manualità e alla personalizzazione in un mondo sempre più standardizzato.

2

2.1 Il fai da te

L'autoproduzione è un concetto che sta trasformando il modo in cui viviamo il consumo e la produzione. Si tratta di una pratica attraverso la quale le persone creano autonomamente beni e soluzioni, partendo dalle proprie esigenze personali. Ma l'autoproduzione è molto più di una semplice pratica: è una filosofia che celebra l'autonomia, la sostenibilità e la creatività personale, incoraggiando ogni individuo a essere protagonista attivo nel plasmare il proprio ambiente. Questo approccio consente di ridurre la dipendenza dai grandi sistemi produttivi, valorizzando invece le risorse locali e l'ingegno individuale. Realizzare un oggetto in autonomia è un atto di autodeterminazione, ma anche un gesto politico, che promuove un consumo consapevole e una relazione più equilibrata con l'ambiente [13].

L'autoproduzione ha radici antiche, che affondano nella storia dell'umanità. Prima dell'industrializzazione, ogni oggetto veniva realizzato manualmente, spesso in casa o nelle botteghe artigiane. Nei contesti rurali, ad esempio, gli utensili e gli arredi erano spesso creati con le risorse disponibili, come legno, pietra o metallo recuperato. Con l'industrializzazione, molte di queste abilità si sono attenuate⁵, ma il fai da te è rimasto vivo, evolvendosi e adattandosi ai tempi moderni. Interessanti, su questo argomento, sono le parole di Maurizio Ferraris nel suo libro *Documanità*: "Dobbiamo prendere coscienza del fatto che [...] l'u-

manità dovrà ripensare il proprio essere al mondo in termini diversi dalla produzione, e anzitutto comprendere che senza i consumi e i bisogni degli umani la produzione non ha alcun senso. Alla luce di questa circostanza, occorre una trasvalutazione di tutti i valori e di tutti i lavori. [...] una trasformazione di quanto ci è consegnato da una tradizione che, per essere antica, non è necessariamente giusta [14]".

Oggi, infatti, grazie alla tecnologia, questa tradizione si rinnova con strumenti sempre nuovi che rendono il processo più accessibile e versatile. Stampanti 3D, macchine CNC e software di design CAD⁶ hanno ampliato il potenziale dell'autoproduzione, consentendo di realizzare oggetti di grande complessità con un livello di precisione che un tempo era prerogativa delle industrie. L'autoproduzione si manifesta in molti ambiti della vita quotidiana, dal bricolage al design tecnologico⁷. Un esempio classico è la costruzione di mobili su misura, spesso realizzati con materiali di recupero, che uniscono funzionalità e creatività. Lampade artigianali, cornici, tessuti personalizzati e decorazioni fatte a mano sono altri esempi di come il fai da te possa aggiungere valore estetico ed emotivo agli oggetti che ci circondano. Ma questa pratica va oltre l'estetica e il risparmio economico: rappresenta un modo per connettersi più profondamente con ciò che possediamo e con il processo di creazione stesso.

5. In riferimento alle abilità manuali tradizionali, come la lavorazione del legno o la sartoria. Queste competenze, un tempo essenziali nella vita quotidiana, hanno ceduto il posto a processi automatizzati e a una maggiore dipendenza da prodotti preconfezionati.

6. Acronimo di "Computer-Aided Design". Si riferisce all'utilizzo di software di modellazione per creare, modificare e analizzare progetti in 2D e in 3D [15].

7. In questo contesto si intende la progettazione con un approccio che combina creatività e competenze tecniche, sfruttando strumenti e materiali innovativi.



Figura 2.1
Postazione di lavoro con attrezzi manuali per la lavorazione del legno [16].

2.2 La diffusione

8. Con questo non si intende che chiunque a casa disponga degli strumenti necessari per effettuare direttamente queste trasformazioni, ma piuttosto che, grazie ai progressi tecnologici, i materiali di recupero siano sempre più accessibili e utilizzabili.

Recentemente, il fai da te ha conosciuto una vera e propria rinascita, trasformandosi da attività di nicchia a fenomeno di massa. Questa evoluzione si è verificata grazie a una serie di fattori che spaziano dall'accessibilità alle attrezzature, alla crescente disponibilità di risorse educative online, fino ai cambiamenti delle abitudini di vita portati dalla pandemia di COVID-19.

Le motivazioni ambientali

Negli ultimi anni, la crescente consapevolezza ambientale ha spinto molte persone a riflettere profondamente sulle proprie abitudini di consumo, inducendo un cambiamento di prospettiva verso uno stile di vita più sostenibile e responsabile. Il fai da te si è imposto come una valida alternativa, offrendo un modo pratico e creativo per ridurre l'impatto sull'ambiente, risparmiare denaro e soddisfare il bisogno di personalizzazione. Realizzare oggetti con le proprie mani significa compiere un gesto concreto contro gli sprechi, recuperando materiali che altrimenti finirebbero in discarica e trasformandoli in qualcosa di utile o bello. È un modo per dare una seconda vita a ciò che consideriamo

scarto, promuovendo così una cultura del riuso e del riciclo che si oppone alla logica dell'usa e getta. Inoltre, il fai da te rappresenta un'opportunità per riscoprire antiche tecniche artigianali, un patrimonio culturale spesso dimenticato che merita di essere tramandato e valorizzato. La manualità artigianale, con le sue infinite possibilità di personalizzazione, stimola la creatività e incoraggia l'ingegno, permettendo di sviluppare competenze pratiche che rafforzano il senso di indipendenza [17]. Il fai da te si conferma quindi come un vero e proprio stile di vita che ci invita a riscoprire il piacere di fare le cose con le proprie mani e di valorizzare le risorse che si hanno a disposizione [18].

Un esempio concreto di questa sinergia tra tecnologia e creatività si trova nell'uso dei materiali sostenibili. Molti progetti di fai da te moderni si concentrano sull'uso di materiali riciclati o biodegradabili, abbracciando una visione più rispettosa dell'ambiente. Le tecnologie moderne, sempre più avanzate, consentono di trasformare scarti di legno, plastica o metallo in nuovi prodotti⁸, riducendo gli sprechi e promuovendo un'economia circolare. Questa attenzione alla sostenibilità sottolinea come il fai da te possa essere non solo un'espressione di creatività, ma anche uno strumento per affrontare sfide globali come l'inquinamento e il consumo eccessivo di risorse.



Figura 2.2
More Than This, collezione di sedie realizzate con materiali di recupero, Curro Claret, Galleria Vinçon, Barcellona, 2014 [19].

Le grandi catene per il bricolage

Una delle principali forze trainanti della popolarità del fai da te è stata l'espansione delle grandi catene di bricolage come Il Guercio, Leroy Merlin (Figura 2.3), Brico Center e Tecnomat. Questi colossi del settore hanno reso il bricolage un'attività accessibile a tutti, non solo agli appassionati di lungo corso, ma anche ai principianti. La chiave del loro successo risiede in diversi fattori, a partire dall'enorme varietà di prodotti offerti. Questi negozi mettono infatti a disposizione materiali di ogni tipo, dai componenti grezzi ai semilavorati di svariate misure e forme, dagli strumenti di base agli oggetti specifici per lavorazioni particolari, rendendo possibile comprare il necessario per qualsiasi progetto. A questa scelta vastissima si affianca una serie di servizi pensati per migliorare l'esperienza degli utenti e facilitare il lavoro sui materiali acquistati. Un esempio è il servizio di taglio dei materiali, che consente agli utenti di acquistare legno, vetro o altri materiali già pronti per l'uso e già tagliati della misura necessaria. Questo servizio risulta particolarmente utile per coloro che non dispongono di attrezzature adeguate o delle competenze necessarie per lavorare i materiali autonomamente a casa.

Figura 2.3
Facciata dello store
Leroy Merlin di
Moncalieri [20].



9. La frase di Mary Gascoigne, scritta nel 1842 nel libro Handbook of Turning, rappresenta un esempio anticipato di questa visione.

In un'epoca in cui le attività manuali erano considerate un dominio quasi esclusivo degli uomini, Gascoigne scrisse: "Perché le nostre belle donne di campagna non dovrebbero partecipare a questo divertimento? Temono forse che sia troppo mascolino e laborioso per una mano femminile?"

Se è così, questo timore è facilmente eliminabile... [21].

Inoltre, grazie alle grandi catene, è stato ampliato il pubblico del bricolage, superando quello che viene considerato il target tradizionale, quello maschile, per coinvolgere un'ampia varietà di persone, tra cui donne e giovani⁹. Tale risultato è stato possibile grazie all'offerta di prodotti intuitivi e semplici da utilizzare, supportati da guide pratiche da esse fornite. Ciò che rende queste grandi catene un'ottima scelta da parte dei consumatori è la strategia di prezzi competitivi: rendendo disponibili materiali e strumenti di buona qualità a costi contenuti, queste aziende hanno fatto del bricolage un'alternativa economica rispetto all'ingaggio di professionisti. Questo modello ha favorito la diffusione del fai da te tra famiglie e singoli, eliminando ostacoli legati ai costi e incoraggiando ad affrontare autonomamente lavori di manutenzione, decorazione o costruzione. Il loro successo va però oltre la semplice vendita: si basa sulla capacità di fornire un'esperienza completa e inclusiva, rendendo il bricolage accessibile a chiunque e promuovendo una vera democratizzazione di questa pratica.

Anche nei supermarket

Parallelamente, si è registrato un incremento dell'accessibilità agli strumenti e ai materiali necessari per il bricolage. Un esempio emblematico è rappresentato dalla linea Parkside, venduta da Lidl (Figura 2.4). Grazie a prezzi contenuti e a una gamma di prodotti pensata per soddisfare sia principianti che utenti avanzati, Parkside ha reso gli strumenti per il fai da te quasi un bene di consumo quotidiano. L'idea di poter acquistare un trapano o una levigatrice durante una semplice spesa al supermercato ha abbattuto un'altra barriera, rendendo il bricolage alla portata di tutti.

Questa democratizzazione degli strumenti non si è però limitata alla fascia economica: anche i marchi più noti hanno ampliato le proprie offerte con linee di prodotti entry-level¹⁰, pensati per chi si avvicina al fai da te per la prima volta.

10. Prodotti o strumenti progettati per i principianti o per chi si avvicina per la prima volta a un determinato campo o attività.



Figura 2.4
Pop-up store Parkside
aperto da Lidl in
Ungheria, Biatorbágy,
2024 [22].

Il ruolo dei social

A contribuire alla diffusione del bricolage è stata anche la straordinaria quantità di contenuti disponibili online. Piattaforme come YouTube, Instagram e TikTok sono diventate autentiche miniere di informazioni per chiunque desideri imparare le basi del fai da te o affinare le proprie competenze. Su YouTube, ad esempio, esistono migliaia di canali dedicati al bricolage che spaziano dalla falegnameria alla decorazione, dall'idraulica alla pittura. Creatori di contenuti offrono tutorial dettagliati, spiegazioni passo-passo e trucchi del mestiere che rendono anche i progetti più complessi accessibili a un pubblico generalista. Instagram e TikTok, invece, si distinguono per contenuti più brevi e immediati (Figura 2.5), che spesso si concentrano su idee creative o soluzioni rapide. Grazie all'uso di video accattivanti e facili da seguire, queste piattaforme hanno reso il bricolage ancora più attraente, in particolare per le generazioni più giovani.

Oltre a queste piattaforme social, un altro elemento nell'evoluzione del fai da te è rappresentato dai forum online e dalle community specializzate. Siti come Reddit¹¹ e Instructables¹² offrono uno spazio dove gli appassionati di bricolage possono scambiarsi esperienze, chiedere consigli, risolvere dubbi tecnici o semplicemente trovare ispirazione. La forza di questi forum sta nella comunità di utenti che interagiscono tra loro, condividendo progetti, foto, istruzioni e suggerimenti pratici. In molti casi questi spazi diventano un punto di riferimento dove anche i principianti possono ricevere supporto da esperti del settore.

Figura 2.5
Video tutorial
postato sul pro-
filo Instagram
di Lidl Italia
[23].



11. Piattaforma di social media e discussione online che ospita numerosi forum dedicati a vari argomenti.

12. Sito web che offre tutorial passo-passo su come realizzare progetti fai da te in diversi ambiti.

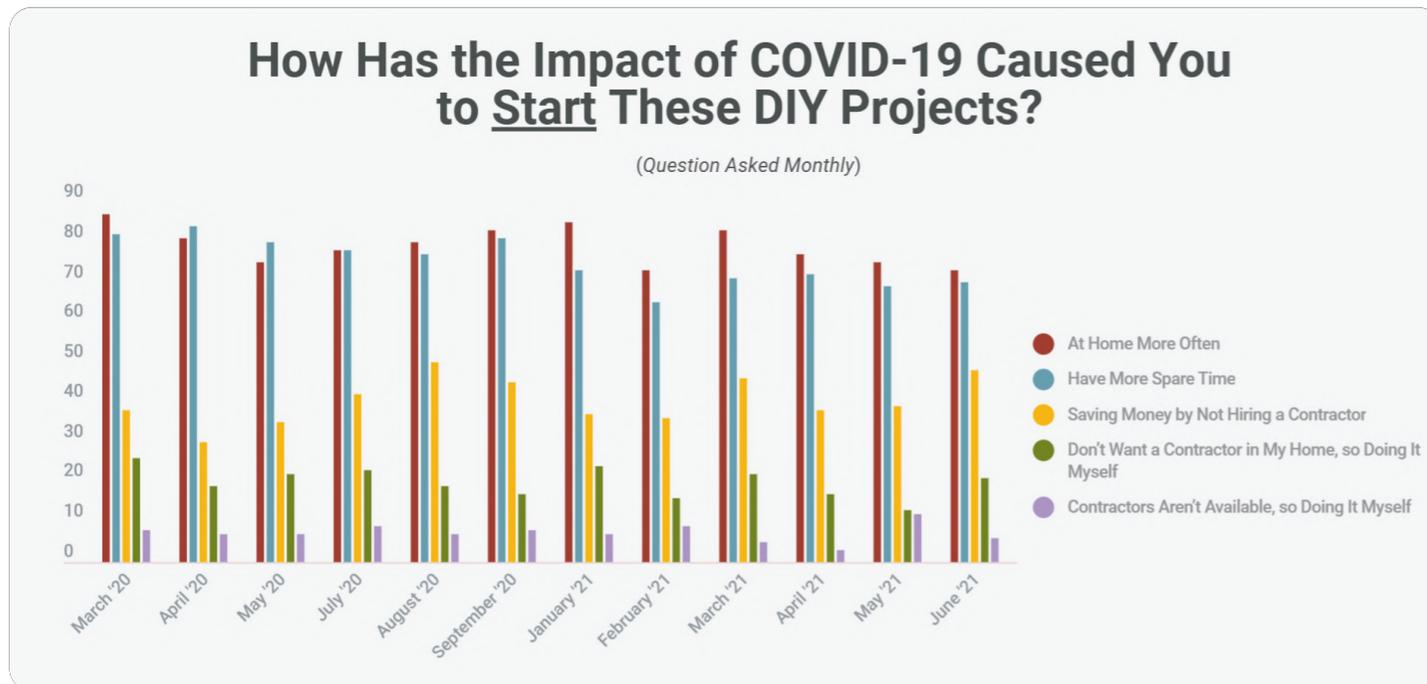
L'impatto del COVID-19

Quella che però probabilmente è la principale causa della fama del fai da te oggi va ricercata nel 2020. La pandemia di COVID-19 ha avuto un impatto profondo su molteplici aspetti della vita quotidiana, ridefinendo il modo in cui le persone trascorrono il loro tempo libero e interagiscono con gli spazi abitativi. Con l'improvvisa necessità di passare gran parte del tempo tra le mura domestiche, la casa ha assunto un ruolo centrale nelle vite di tutti: spazi prima destinati al riposo o alla convivialità si sono trasformati in uffici, palestre e ambienti multifunzionali. Questa evoluzione ha spinto molte persone a migliorare il comfort e la funzionalità degli spazi abitativi, spesso at-

traverso interventi di fai da te. Per necessità, a causa della difficoltà di accessibilità a servizi professionali, molti hanno iniziato a dedicarsi a piccole riparazioni o modifiche per adattare gli spazi alle nuove esigenze quotidiane. In breve tempo però, il bricolage è diventato anche una forma di svago e una valvola di sfogo creativa. La possibilità di dedicarsi a progetti manuali ha infatti rappresentato per molti un antidoto contro l'ansia e la monotonia imposte dal confinamento. Sono infatti diverse le motivazioni che hanno spinto le persone ad intraprendere progetti di fai da te durante questo periodo [24] (Figura 2.6).

Secondo recenti studi, i Millennials¹³, rispetto alla Gen X¹⁴ e a quella dei Boomer¹⁵, sono stati tra i protagonisti di questa nuova ondata di attività fai da te durante la pandemia (Figura 2.7). Questa generazione ha trovato nel bricolage non solo una forma di intrattenimento o un modo per rinnovare gli ambienti, ma anche una vera e propria strategia per affrontare l'aumento delle spese quotidiane. Grazie alla possibilità di realizzare da sé interventi di miglioramento, hanno potuto contenere i costi legati a ristrutturazioni o acquisti di arredamenti, combinando la soddisfazione di personalizzare il proprio spazio con il vantaggio economico di ridurre le spese.

Figura 2.6
Grafico che mostra le persone che hanno intrapreso progetti di fai da te nel 2020-2021 e le motivazioni che li hanno spinti, 2021 [24].



Have You Started Any New DIY Projects In or Around Your Home in the Last Month? (By Age)

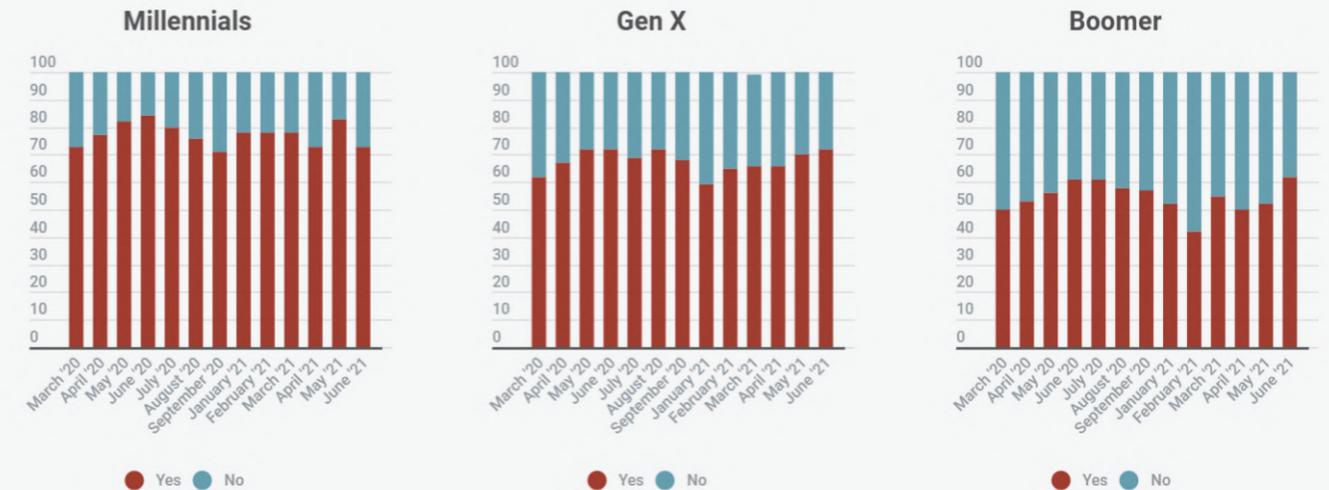


Figura 2.7
Grafico che mostra quante persone, di tre diverse fasce d'età, hanno intrapreso progetti di fai da te nel 2020-2021, 2021 [24].

13. Generazione nata indicativamente tra il 1981 e il 1996. Cresciuti durante l'era digitale e la globalizzazione, sono spesso definiti "nativi digitali" per la loro familiarità con le tecnologie informatiche e internet [25].

14. Persone nate tra il 1965 e il 1980. Cresciuti in un periodo di transizione tra valori tradizionali e modernità. Hanno vissuto l'avvento delle tecnologie analogiche e digitali, risultando spesso mediatori tra i "Boomer" e i "Millennials" [26].

15. Generazione nata tra il 1946 e il 1964, durante il boom demografico del dopoguerra. Sono spesso associati a valori tradizionali e a una forte etica del lavoro [27].

Oggi, anche con la progressiva riduzione delle restrizioni legate alla pandemia, l'interesse per il bricolage non sembra essere diminuito. Al contrario, molte persone hanno scoperto una passione duratura per il fai da te e continuano a dedicarsi a progetti di autoproduzione e a sperimentare tecniche sempre nuove per costruire o reinventare gli oggetti più disparati.

2.3 Le nuove tendenze

Il fai da te, un tempo confinato alla dimensione artigianale e domestica, sta vivendo una trasformazione radicale grazie alle nuove tecnologie. Ci troviamo in un'epoca in cui creatività e innovazione tecnica si fondono, dando vita a un bricolage del futuro che unisce tradizione e modernità. L'avvento di strumenti tecnologici avanzati e facilmente accessibili ha aperto possibilità impensabili, portando il fai da te a un livello di precisione e complessità che sfida i confini della produzione industriale. Oggi, software di progettazione intuitivi, come SketchUp o Fusion 360, consentono anche ai principianti di ideare e realizzare oggetti personalizzati con un livello di dettaglio incredibile. Questi programmi permettono di creare modelli tridimensionali virtuali pronti per essere trasformati in realtà fisica grazie a strumenti come stampanti 3D e macchine CNC. Quello che un tempo richiedeva anni di pratica artigianale può ora essere raggiunto con un mix di competenze digitali e manuali, aprendo le porte del fai da te a una gamma sempre più ampia di persone.

Questa evoluzione tecnologica ha anche portato alla nascita di una cul-

tura globale del fare, radicata nei movimenti dei makers¹⁶ e nei Fab Lab¹⁷ (laboratori di fabbricazione). Questi spazi condivisi, presenti in tutto il mondo, mettono a disposizione strumenti avanzati e risorse educative democratizzando l'accesso alla tecnologia. Nei Fab Lab, chiunque può imparare a utilizzare una stampante 3D, progettare con un software CAD o lavorare su progetti di elettronica avanzata [28]. Inoltre il concetto di collaborazione è centrale: idee e progetti vengono condivisi liberamente, favorendo lo scambio di conoscenze e l'innovazione collettiva. La filosofia alla base di questa rivoluzione del fai da te è inclusiva e orientata al progresso. Non si tratta solo di creare oggetti utili o decorativi, ma di promuovere una mentalità aperta in cui la tecnologia diventa uno strumento per risolvere problemi, esprimere creatività e generare impatto sociale [11]. Questo ha portato alla nascita dei makers, appassionati, professionisti e curiosi che sono parte di un movimento che non si limita a lavorare per sé stessi, ma contribuisce attivamente alla comunità globale, condividendo i propri progetti e imparando dagli altri.

16. Dall'inglese "creatore", "fabbricante".
Persone che svolgono attività di bricolage e, in generale, di fai da te avvalendosi di tecnologie digitali. In italiano vengono detti anche artigiani digitali [28].

17. Abbreviazione di "fabrication laboratory", dall'inglese "laboratorio di fabbricazione".
Spazio condiviso dotato di strumenti e tecnologie digitali destinato alla progettazione e alla realizzazione di prototipi e manufatti. Il primo Fab Lab in Italia ha aperto a Torino nel 2011 [8, 29].



Figura 2.8
Postazione di lavoro tipica di un laboratorio di fabbricazione (Fab Lab) [30].

2.4 L'accessibilità alle nuove tecnologie

Nonostante la stampa 3D abbia rivoluzionato il mondo della manifattura personalizzata, non tutti hanno la possibilità o l'interesse di investire in una stampante personale. Per questo motivo, negli ultimi anni sono emerse numerose alternative che consentono di accedere a questa tecnologia senza la necessità di acquistare o gestire un dispositivo proprio. Molte copisterie moderne, seguendo l'evoluzione delle tecnologie di stampa, hanno aggiunto ai loro servizi tradizionali la possibilità di stampare in 3D. Questi esercizi offrono supporto sia tecnico che pratico, permettendo ai clienti di trasformare i propri file digitali in oggetti tangibili senza dover affrontare le complessità di configurazione o manutenzione delle macchine. Contrariamente a quanto si possa pensare, non solo designer o professionisti possono trarne vantaggio: queste copisterie rappresentano un punto di accesso importante per chi non ha competenze tecniche ma vuole comunque realizzare un oggetto in 3D. Chiunque, recandosi in una tipografia attrezzata, può semplicemente spiegare la sua idea o portare un file scaricato da Internet e ottenere il prodotto finito

senza complicazioni. Così come le copisterie, anche la diffusione dei Fab Lab ha facilitato l'accesso a macchinari e tecnologie specifiche per diverse applicazioni a chiunque ne avesse bisogno. I Fab Lab, però, rappresentano veri e propri laboratori condivisi dotati di attrezzature avanzate come stampanti 3D e macchine CNC. Qui, oltre a usufruire di questi dispositivi, è spesso possibile ricevere consulenza e formazione rendendo questi spazi ideali per studenti, designer e maker. In questi luoghi però anche chi non ha familiarità con queste tecnologie può trovare supporto grazie alla presenza di esperti disponibili a guidare i meno esperti passo dopo passo [11]. L'accesso a servizi di stampa 3D esterni è particolarmente utile in una vasta gamma di situazioni. Per i professionisti, come designer e architetti, è una risorsa preziosa per la realizzazione di prototipi e modelli ad alta precisione, indispensabili per presentazioni o test funzionali. Il vero punto di forza di questi servizi risiede, tuttavia, nella loro capacità di essere accessibili anche a chi ha esigenze occasionali o un'esperienza limitata.

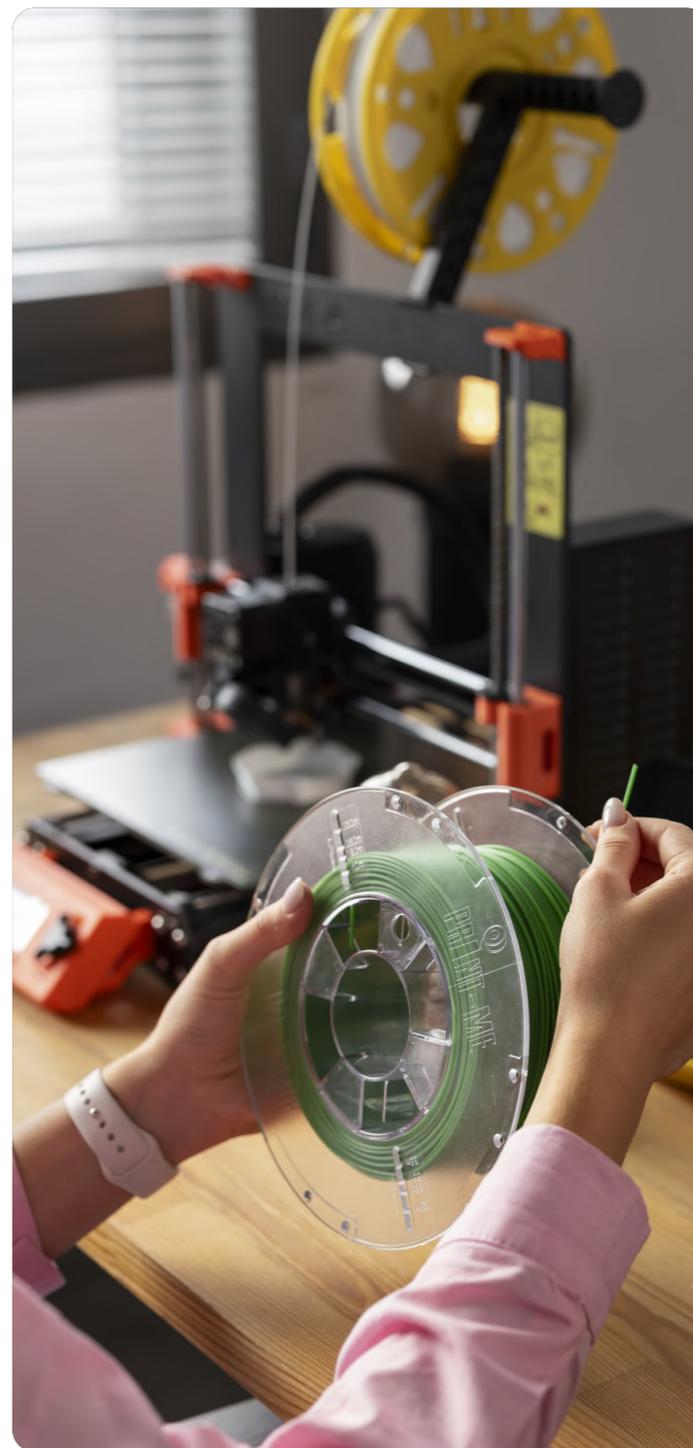


Figura 2.9
Sostituzione della bobina su una stampante 3D a filo caldo [31].

18. L'espressione si riferisce a un servizio o prodotto fornito in modo completo e pronto per l'uso, senza che l'utente debba occuparsi di ulteriori operazioni.

19. Acronimo di "Stereolithography". Processo che si basa sulla polimerizzazione di una resina liquida fotosensibile tramite un raggio laser UV [32].

20. Acronimo di "Selective Laser Sintering". Tecnica di stampa 3D che utilizza un laser per fondere selettivamente particelle di polvere [33].

La digitalizzazione ha ulteriormente semplificato l'accesso alla stampa 3D. Numerose piattaforme online offrono un servizio "chiavi in mano"¹⁸: l'utente carica il modello 3D, seleziona il materiale e il tipo di finitura desiderata e riceve il prodotto finito direttamente a casa. Queste piattaforme spesso collaborano con una rete di fornitori locali e internazionali, garantendo una vasta scelta di materiali e tecnologie, come FDM, SLA (Stereolitografia)¹⁹ o SLS (Sinterizzazione Laser Selettiva)²⁰. Questo approccio è particolarmente interessante per chi non vuole occuparsi della manutenzione delle stampanti, della gestione dei materiali o dell'apprendimento tecnico richiesto per ottimizzare i risultati. Inoltre, è un'opzione eccellente per chi necessita di materiali specifici o di qualità superiore, come resine ad alta trasparenza o filamenti tecnici, difficili da gestire a livello domestico. Essendo una tecnologia ancora emergente e in fase di espansione, è importante sottolineare che i costi di questi servizi sono ancora elevati, specialmente se si vogliono realizzare oggetti di media e grande dimensione. In futuro, con la crescente diffusione, i prezzi si ridurranno progressivamente, rendendone l'accesso sempre più semplice.

2.5 L'open source

L'approccio open source ha abbattuto le barriere che tradizionalmente separavano i professionisti dai dilettanti creando un ecosistema collaborativo in cui qualunque appassionato può dare il proprio contributo e beneficiare di quello altrui. L'open source, letteralmente "sorgente aperta", si basa sulla condivisione libera e gratuita di risorse, in particolare di file digitali o competenze [34]. Nel contesto delle nuove tecnologie come la stampa 3D, l'open source non solo ha democratizzato l'accesso a risorse e strumenti, ma ha anche alimentato una cultura di partecipazione globale, rendendo possibile l'innovazione condivisa. Le piattaforme online rappresentano il cuore di questa rivoluzione, offrendo repository²¹ gratuiti o a pagamento di modelli 3D. Thingiverse è uno dei siti più noti, grazie alla sua vasta gamma di progetti e ad un'inter-

faccia intuitiva (Figura 2.10) ideale per i principianti e gli appassionati. È una piattaforma gratuita dove utenti di tutto il mondo condividono i propri progetti. Per chi cerca maggiore qualità e affidabilità ci sono anche altre piattaforme che offre modelli verificati, spesso a pagamento, assicurando una stampa più di qualità poiché testati in precedenza. Questi file, generalmente in formato STL²² o altri formati compatibili, rappresentano modelli tridimensionali pronti per essere stampati o modificati. Grazie alle piattaforme, chiunque può accedere a una vasta libreria di modelli che spaziano dai più semplici oggetti quotidiani a progetti altamente tecnici o artistici. Un punto cardine di questo movimento è la filosofia del riuso e della personalizzazione. I file open source possono essere scaricati, modificati e adattati alle esigenze specifiche di ogni utente.

21. Dall'inglese "deposito", "archivio". Archivio digitale dove vengono conservati e condivisi file o dati.

22. Formato di file che descrive la geometria tridimensionale di un oggetto, semplificandola tramite una rete di triangoli. È il file standard utilizzato nel mondo della stampa 3D [35].

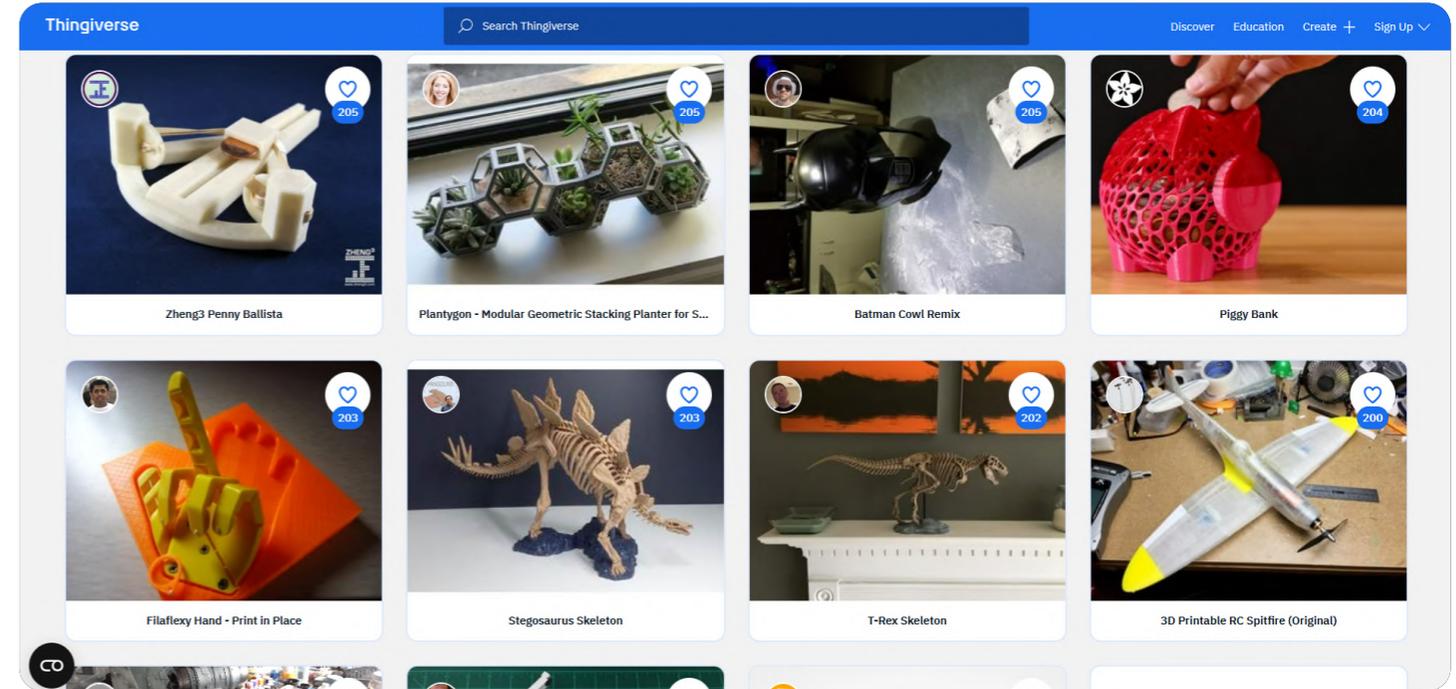


Figura 2.10
Interfaccia di Thingiverse, la piattaforma online più diffusa di file STL gratuiti [36].

Le community di maker rappresentano un pilastro fondamentale dell'ecosistema legato alla stampa 3D e, più in generale, al movimento open source. Questi gruppi incarnano i valori di innovazione, collaborazione e apprendimento continuo, diventando il cuore pulsante di una cultura basata sul "Do It Yourself"²³. La loro influenza si estende dal mondo virtuale alle interazioni fisiche nei Fab Lab, promuovendo l'accesso democratico alla tecnologia e la co-creazione di soluzioni innovative.

23. Spesso abbreviato con la sigla DIY, è la traduzione inglese di "Fai da te".

2.6 Le criticità del fai da te

Il movimento del fai da te offre innumerevoli possibilità ma, come insegna il noto proverbio, “non è tutto oro quel che luccica”. Il bricolage infatti non è privo di sfide, che possono compromettere sia la riuscita dei progetti sia la sicurezza di chi decide di cimentarsi in questa attività di produzione.

La mancanza di competenze professionali è tra i principali problemi del fai da te moderno: molte persone si lanciano in progetti complessi basandosi su tutorial trovati online, che spesso forniscono istruzioni incomplete o semplificate, portando a errori non indifferenti, risultati qualitativamente scadenti o addirittura pericolosi. La facilità con cui si accede alle informazioni digitali può quindi indurre le persone a sottovalutare la complessità dei compiti da svolgere, generando un falso senso di sicurezza che rischia di sfociare in fallimenti o incidenti. Ad esempio, per svolgere mansioni o lavori di ambiti tecnici come la ristrutturazione edilizia, l'elettronica o la programmazione, sono richieste conoscenze approfondite che non possono essere improvvisate da chiunque. Un altro aspetto da considerare riguarda i costi nascosti. Sebbene il fai da te venga spesso scelto per motivi di risparmio, la realtà è che molte attività richiedono investimenti significativi in

materiali, attrezzature specialistiche e tempo. Quest'ultimo elemento, spesso sottovalutato, rappresenta una risorsa preziosa che può rendere il fai da te meno conveniente rispetto all'acquisto di soluzioni preconfezionate o all'intervento di un professionista. Inoltre, se un progetto non viene completato correttamente, le eventuali riparazioni o i rifacimenti possono far lievitare notevolmente i costi complessivi annullando il presunto risparmio iniziale [37]. Nel bricolage un altro fattore fondamentale è l'adozione di misure preventive, come l'uso di dispositivi di protezione individuale²⁴ e l'attenzione ai comportamenti durante l'esecuzione dei lavori. L'utilizzo improprio di utensili e attrezzi durante le attività di fai da te può causare infortuni significativi, a volte anche gravi. Da non trascurare è anche l'aspetto psicologico nascosto dietro i lavori di bricolage. Mentre alcuni trovano in questa attività un'opportunità per rilassarsi e dare sfogo alla propria creatività, altri possono sperimentare stress e frustrazione quando i risultati non corrispondono alle aspettative. Oltretutto, il tempo necessario per apprendere nuove competenze, pianificare i progetti e realizzarli può essere maggiore di quanto previsto, causando insoddisfazione o senso di fallimento.

24. Anche noti con l'acronimo DPI, sono accessori che hanno la funzione di salvaguardare chi li indossa da rischi per la salute e la sicurezza, proteggendo in tutto o in parte da tali rischi [38].

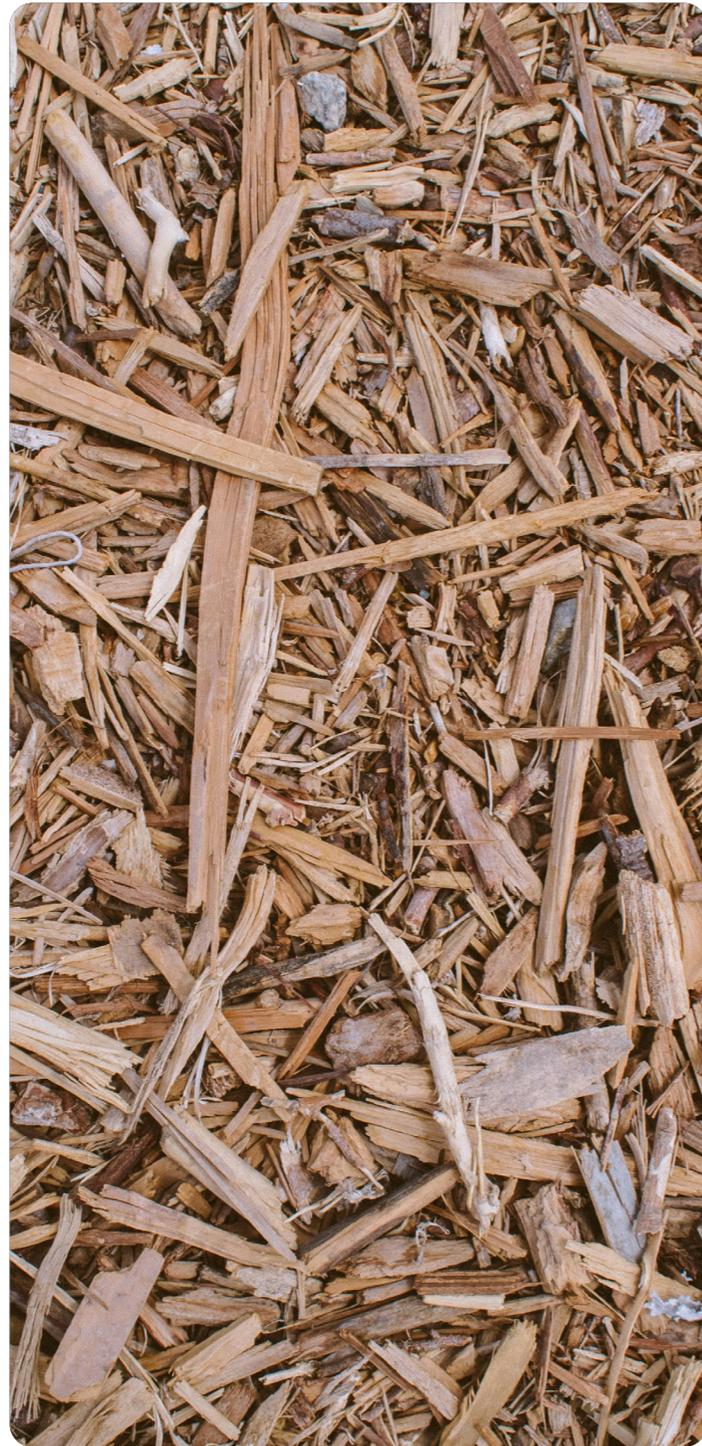
Figura 2.11
Fase di incollaggio di due pezzi di legno [39].



Il fai da te del presenta inoltre un impatto ambientale da non trascurare: sebbene venga spesso associato a pratiche sostenibili, come il riciclo o il riutilizzo dei materiali, errori durante la realizzazione dei progetti possono portare a sprechi significativi. Inoltre, l'acquisto di strumenti o materiali di bassa qualità, spesso realizzati in modo non sostenibile, contribuisce a generare rifiuti difficilmente smaltibili, aggravando ulteriormente il problema.

Un'ulteriore difficoltà risiede nella conformità alle normative legali e tecniche. Molti progetti fai da te, specialmente in settori regolamentati come l'edilizia o l'elettronica, rischiano di non rispettare le norme di sicurezza o di qualità previste dalla legge [37]. Questo non solo può comportare sanzioni o obblighi di rifacimento, ma può anche invalidare garanzie o polizze assicurative, esponendo chi pratica il fai da te a rischi finanziari. Nel contesto del nuovo millennio infine, la dipendenza dalle tecnologie digitali introduce altre problematiche. Sebbene le piattaforme online offrano una fonte inesauribile di informazioni e ispirazione, l'enorme quantità di contenuti disponibili rende difficile distinguere tra fonti affidabili e non. Questo carico di informazioni può confondere gli utenti meno esperti, che rischiano di seguire consigli errati o di trovarsi sopraffatti dalla complessità delle informazioni.

Figura 2.12
Scarti di diverse
tipologie di legno [40].



Il fai da te può essere un'attività estremamente gratificante e utile, ma solo se affrontato con la giusta preparazione e consapevolezza. Prima di intraprendere un progetto è essenziale fermarsi a valutare attentamente tutti gli aspetti coinvolti. Solo attraverso una pianificazione accurata e una buona dose di umiltà nel riconoscere i propri limiti è possibile evitare errori e insoddisfazioni, trasformando ogni iniziativa fai da te in un'esperienza formativa. Assumere consapevolezza di queste dinamiche significa non solo aumentare le probabilità di un risultato positivo, ma anche preservare il piacere e la soddisfazione che questa pratica può offrire.

Il giunto per forma

Il giunto per forma, una soluzione progettuale per connettere due o più elementi senza ausili come colle e viti. Queste connessioni, molte delle quali di antico ingegno, resistono al tempo e alle forze, destando curiosità e ammirazione.

3

3.1 Che cos'è

Il concetto di giunto per forma rappresenta uno degli approcci più raffinati nell'ambito delle connessioni nel design e nell'architettura. Questo tipo di giunzione si fonda su un principio apparentemente semplice, ma straordinariamente ingegnoso: l'assemblaggio stabile di due o più componenti sfruttando unicamente le loro geometrie, le proprietà fisiche dei materiali, e le forze naturali come gravità, attrito e pressione [41]. In tal modo, un giunto per forma permette la connessione tra elementi senza l'utilizzo di componenti aggiuntivi come viti, chiodi o collanti. Oggi questa categoria di connessioni si è allargata a quegli accessori, come nel caso dei prodotti in prototipazione rapida, che utilizzano la forma per avvolgere, contenere e connettere gli elementi da unire. Il montaggio e lo smontaggio diventano così operazioni elementari che possono essere compiute da una sola persona e con poco sforzo fisico. Applicati all'arredamento, questi giunti facilitano gli spostamenti dei mobili nei traslochi e ne determinano una facile modularità per aggregazione.

Figura 3.1
Sedia S11, Dettaglio della
connessione delle gambe
basata su un giunto
per forma, Pierre Chapo,
1978 [42].



3.2 Che cosa non è

Per capire però cos'è un giunto per forma è fondamentale definire cosa non è (Figura 3.2).

Non sono da considerarsi giunti per forma tutte le connessioni irreversibili quali saldature (a), rivettature (f), chiodature (e), incollaggi (b) e unioni a umido (c), e connessioni reversibili quali collegamenti filettati (g) e linguette (d). Anche i giunti di trasmissione (m), gli innesti (h), le spine elastiche (i) e le coppiglie (l) non sono considerati giunti per forma [41].

Esistono, tuttavia, alcune connessioni che possono essere categorizzate come giunti per forma anche quando prevedono un accessorio che rende la struttura ancora più efficace, purché questo elemento sia di facile rimozione, sia progettato come parte integrante dell'oggetto e contribuisca all'espressione estetica complessiva [41]. Un esempio emblematico di questo approccio è la Tube chair di Joe Colombo²⁵, in cui l'uso di un semplice morsetto elastico facilita l'assemblaggio e lo smontaggio della seduta, senza compromettere la sua integrità funzionale o estetica (Figura 3.3 a pagina 49).

25. Artista e designer italiano (1930-1971). Si affermò come uno dei migliori designer italiani, orientando la sua attività progettuale sugli oggetti per l'abitare [43].

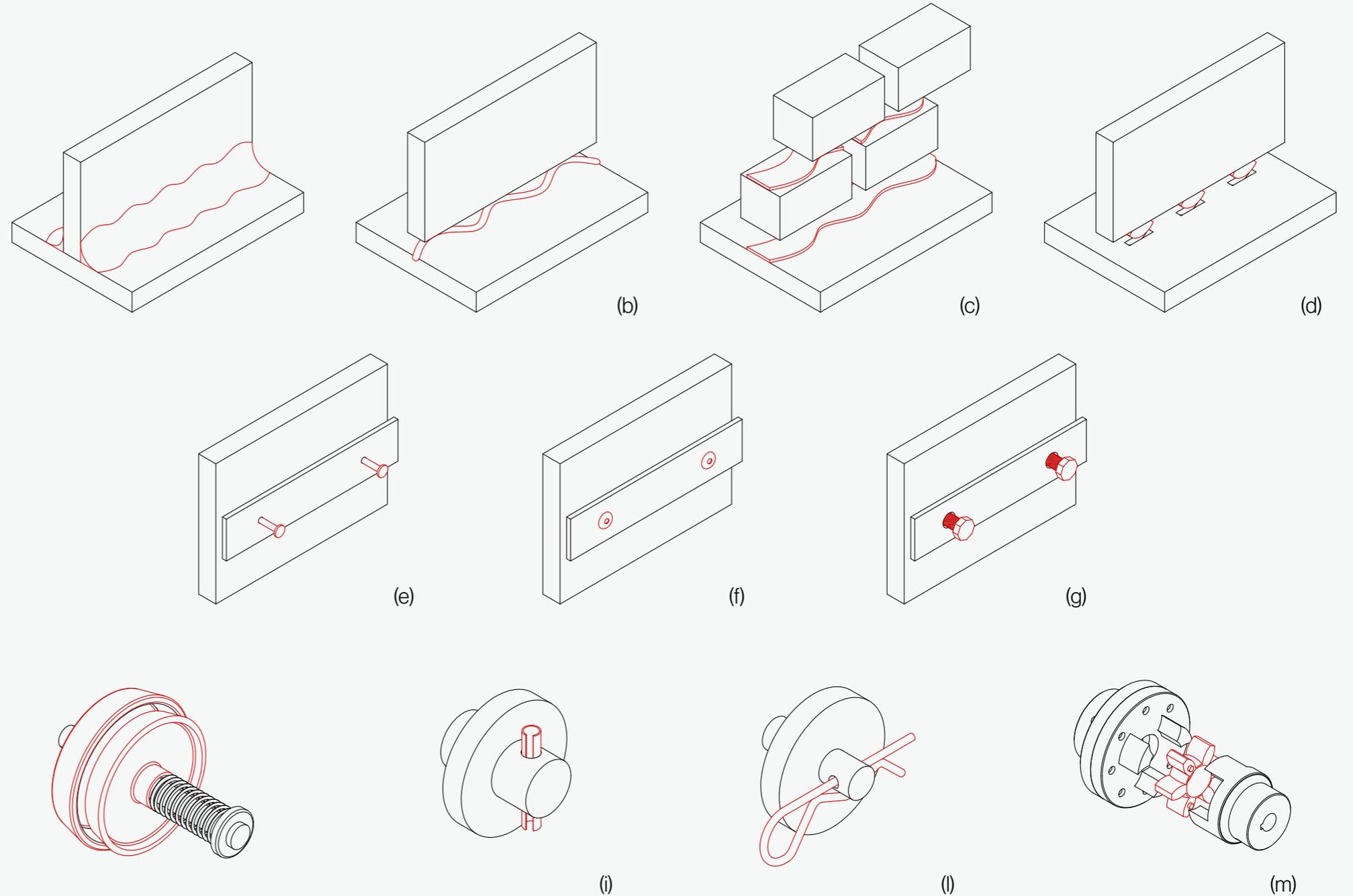


Figura 3.2
Rappresentazione grafica di tutte le connessioni che non sono considerate giunti per forma.

3.3 La poetica della connessione

Il giunto per forma non è solo una scelta tecnica e pratica, ma una filosofia progettuale carica di significato nel ruolo strutturale del giunto stesso e nel contributo offerto all'espressività dell'intero sistema²⁶. Il giunto per forma racchiude, inoltre, una raffinata ricerca di valori. In primo luogo, infatti, questa tipologia di connessione consente ai componenti di mantenere la propria identità tecnica e percettiva: ogni elemento, pur facendo parte di un insieme, rimane "distinto" e "semplice" nella sua funzione, evitando di confondersi con gli altri, arricchendo l'oggetto di una dimensione estetica e narrativa, celebrando il ruolo dell'individualità dei componenti, la complessità del progetto e il piacere della scoperta estetica e funzionale²⁷.

Il giunto per forma rappresenta una vera e propria "poetica della connessione", spingendo il progettista a superare il consueto e a esplorare soluzioni innovative, in cui la tecnica si fonde con la creatività. Per l'osservatore questo si traduce in un'esperienza visiva che stimola la curiosità, invitandolo a scoprire le regole nascoste del progetto e a comprendere la logica del suo funzionamento [41].

La forma stessa del giunto diventa quindi un valore, un linguaggio che racconta la relazione tra gli elementi, invitando a osservare l'oggetto in modo più attento e consapevole.

26. Il giunto per forma può essere considerato come un sistema complesso, e quindi analizzato secondo i principi del Design Sistemico, un approccio progettuale che considera ogni elemento di un progetto come parte di un sistema più ampio caratterizzato da interconnessioni e interdipendenze.

27. Guardando al progetto attraverso uno sguardo sistemico, Mario Fois, in un articolo, dice: "Creare una prospettiva sistemica attraverso la ricerca delle relazioni e delle connessioni esistenti valutando le loro conseguenze, costituisce per il design la condizione necessaria per poter immaginare nuove possibilità progettuali e renderle realizzabili [45]".

Figura 3.3
Tube chair, dettaglio del morsetto elastico che connette le diverse parti della seduta, Joe Colombo, Cappellini, 1969 [44].



3.4 Le origini del giunto per forma

La carpenteria giapponese è una tradizione millenaria che si distingue per l'uso magistrale degli incastri lignei, una tecnica che consente di unire elementi in legno senza l'uso di chiodi o colla.

Questa tecnica affonda le sue radici in motivazioni sia pratiche che filosofiche. In un paese ricco di foreste ma povero di metalli, il legno è sempre stato la risorsa principale per le costruzioni [46]. Inoltre, in una terra soggetta a frequenti terremoti, le strutture in legno, leggere ed elastiche, offrono una resistenza superiore rispetto a materiali più rigidi come acciaio e calcestruzzo. Gli incastri lignei, infatti, garantiscono un'ottima stabilità dell'intera struttura, al punto che un giunto danneggiato non compromette l'intera costruzione. Dal punto di vista spirituale, nella cultura giapponese il legno è profondamente rispettato, in quanto

portatore di valori shintoisti²⁸. Questo rispetto spinge i carpentieri a lavorare in sintonia con la natura, valorizzando sia le qualità che le imperfezioni del materiale [47]. L'arte del Sashimono²⁹ (letteralmente "cose unite"), nata tra il X e il XII secolo, ha portato allo sviluppo di oltre 400 tipologie di incastri, utilizzati in edifici monumentali come templi e castelli, ma anche in abitazioni e arredi. In questo sistema, la complessità risiede nel progetto e nella logica interna, non nelle singole parti, conferendo alle opere una combinazione unica di eleganza, funzionalità e durata nel tempo. È infatti proprio questo concetto a guidare oggi giorno l'approccio progettuale che si cela dietro all'ideazione di un giunto per forma; ricercare la complessità non nei singoli componenti, ma nel progetto stesso e nelle sue logiche interne.

28. Valori della religione Shintō, dal giapponese 神 (shin), "spirito", e 道 (tō), "via". Religione incentrata sulla venerazione della natura e dei "kami", spiriti divini che risiedono in ogni elemento naturale [48].

29. Tradizionale tecnica giapponese di incastri lignei, chiamati "hozo", per unire le tavole in modo stabile e invisibile, garantendo un'estetica pulita e raffinata. L'origine del termine "Sashimono" è legata all'uso del "monosashi", un righello tradizionale utilizzato per misurare con precisione i materiali lignei [49].

Figura 3.4
Incastro ligneo basato sulla tecnica del Sashimono, Dylan Iwakuni, Giappone, 2024 [50].



3.5 Classificazione dei giunti per forma

All'interno del vasto e variegato panorama che caratterizza questa tipologia di connessioni, emerge la necessità di distinguere le diverse categorie di giunti per forma. Classificare in modo sistematico l'infinita varietà di soluzioni progettate dai designer nel corso degli anni rappresenta però una sfida non da poco. Per questo motivo gli studiosi [5] hanno adottato un criterio di suddivisione basato sui principi fisici che regolano il funzionamento di ciascun giunto, offrendo così una chiave di lettura funzionale e universale.

Giunti per gravità

Sfruttano l'azione fisica della massa³⁰ degli elementi per creare una connessione stabile tra i componenti. A seconda del materiale e della disposizione delle parti, questa forza può risultare più o meno determinante per la stabilità della struttura complessiva, ma rimane comunque un fattore sempre presente nelle connessioni per forma.

Un esempio di giunture che rientrano in questa categoria sono i tavoli in pietra di Angelo Mangiarotti³¹ (Figura 3.6).

30. Quantità di materia, omogenea o no, unita in un solo pezzo, indipendentemente dalla forma che l'insieme assume o può assumere [51].

31. Designer che ha fatto del giunto per forma il fulcro della sua ricerca. In questi tavoli, il piano orizzontale, grazie al suo peso, si adagia sull'elemento verticale, creando un equilibrio stabile basato esclusivamente su tangenza e gravità [52].

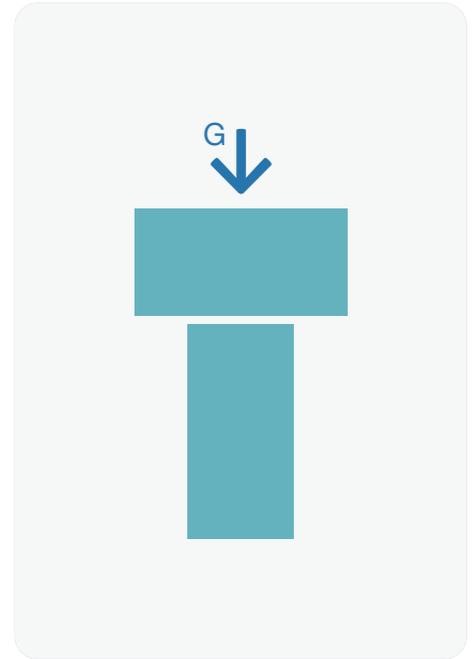


Figura 3.5 ➤
Rappresentazione grafica del funzionamento di un giunto per gravità.

Figura 3.6 ➔
Tavolo Eros, dettaglio dell'innesto al piano della gamba a sezione tronco-conica, Angelo Mangiarotti, 1971 [53].

Giunti a pressione

Utilizzano uno sforzo di compressione tra le superfici a contatto per ottenere un accoppiamento saldo. La connessione si basa sulla forza di attrito generata dalla pressione esercitata tra le parti, che impedisce lo scivolamento e assicura la trasmissione delle sollecitazioni³² senza la necessità di elementi aggiuntivi di fissaggio. Un esempio rappresentativo di tale tipologia di giunto per forma è il tavolino Carati (Figura 3.8) disegnato da Mario Alessiani nel 2015. In questo oggetto si può osservare una relazione atipica tra le gambe del tavolino e il suo piano di appoggio, dove la struttura sopporta una pressione orizzontale e non verticale, come accade normalmente ai tavoli.

32. Trasferimento delle forze assorbite da una parte a un'altra parte adiacente.

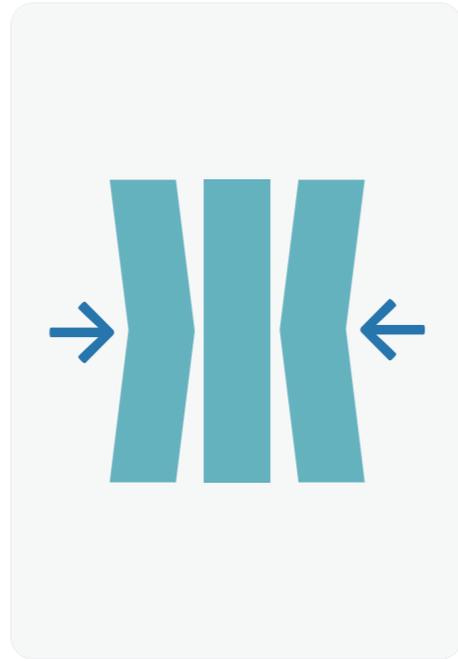


Figura 3.7 ➤ Rappresentazione grafica del funzionamento di un giunto a pressione.

Figura 3.8 ➔ Carati, tavolino in legno e metallo basato su un giunto a pressione, Mario Alessiani, 2015 [54].

Giunti ad attrito statico

In questo caso, è la natura intrinseca del materiale, determinata dal suo coefficiente di attrito³³, insieme alla specifica forma utilizzata, a generare una resistenza meccanica allo scivolamento tra le superfici a contatto. Tale resistenza è il risultato dell'interazione fisica tra la superficie del materiale e le forze tangenziali³⁴ applicate, che vengono efficacemente contrastate grazie all'attrito sviluppato. I mattoncini Lego (Figura 3.10), considerati tra i giocattoli per bambini più diffusi al mondo, si basano su un giunto per forma di questo tipo. Il loro principio di incastro è oggi usato come connessione di riferimento anche nel settore delle costruzioni civili prefabbricate. Un altro oggetto che si basa su questo principio fisico, e che ne fa interamente il suo punto di forza espressivo, è la lampada Parentesi³⁵ di Achille Castiglioni.

33. Numero scelto per misurare l'attrito che si manifesta fra due corpi a contatto dotati di moto relativo [55].

34. Ovvero applicate lungo una direzione tangente alla superficie di contatto tra due corpi.

35. Lampada iconica il cui fulcro è la forma del tubolare in acciaio a forma di parentesi (da qui il nome) che consente lo scorrimento lungo un cavo teso e la sua posizione viene mantenuta grazie all'attrito radente, rimuovendo la necessità di meccanismi di fissaggio.

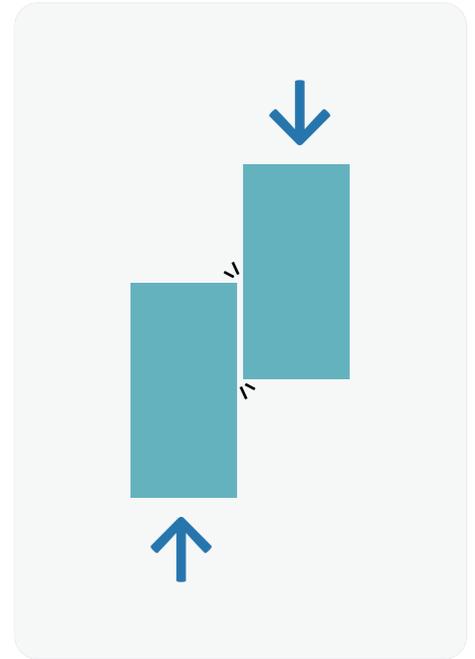


Figura 3.9 ➤ Rappresentazione grafica del funzionamento di un giunto ad attrito statico.

Figura 3.10 ➔ Mattoncini LEGO, il più celebre dei mattoncini da costruzione giocattolo, Godtfred Kirk Christiansen, 1958 [56].

Giunti per opposizione

Sono caratterizzati da due o più componenti che vanno a contrasto tra di loro generando una sorta di azione-reazione³⁶. Tale interazione genera uno scambio di forze che contribuisce in modo determinante alla rigidità complessiva del giunto, permettendo di trasferire carichi e di garantire la stabilità strutturale.

Un esempio di questa tipologia è rappresentato dal classico giunto cruciforme in legno (Figura 3.1 a pagina 45).

36. Principio basato sulla Terza Legge di Newton, secondo cui a ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria [57]. Nel caso dei giunti significa che quando un componente subisce una forza, l'altro reagisce con una di pari intensità ma in direzione opposta.

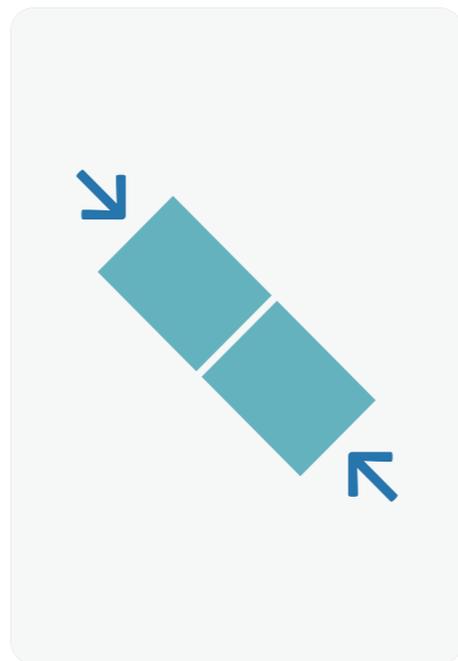


Figura 3.11 ↗

Rappresentazione grafica del funzionamento di un giunto per opposizione.

Figura 3.12 →

Tensile, scaffale basato su un giunto per opposizione che sfrutta l'elasticità e la flessibilità del materiale per sostenere i piani, Hiroyuki Ikeuchi, 2017 [58].

Figura 3.13 →→

Half-throttle, scaffale in legno basato su un sistema di opposizione per rotazione, Kohdai Iwamoto, 2013 [59].

3.6 Una pratica sostenibile

L'importanza del giunto per forma risiede non solo nel suo valore funzionale ed espressivo, ma anche nel suo contributo alla sostenibilità del prodotto finale. In un mondo che guarda con crescente attenzione al design circolare, queste connessioni favoriscono la modularità e la durabilità degli oggetti, consentendo una manutenzione facilitata e, a fine vita, una separazione dei materiali che agevola il riciclo. Sfruttando una connessione basata su un giunto per forma, infatti, i componenti si uniscono gli uni agli altri a formare un sistema in modo reversibile, dunque le forme progettate possono sempre essere "recuperabili", a differenza invece delle connessioni non per forma, specie quelle irreversibili quali per esempio la saldatura.

Dal punto di vista progettuale, quindi, il giunto per forma può essere visto come un sistema composto da diverse parti che, unite, creano qualcosa di più grande e complesso.

Questa unione dà origine a ciò che si definisce proprietà emergenti³⁷: "Un comportamento emergente o proprietà

emergente può comparire quando un numero di entità semplici (agenti) operano in un ambiente, dando origine a comportamenti più complessi in quanto collettività. [60]"

Tale approccio permette di creare oggetti in cui ogni componente mantiene la sua identità, arricchendo l'intera struttura con un valore aggiunto che non è solo pratico, ma anche culturale e sostenibile. In questa luce, i giunti per forma possono essere interpretati secondo le riflessioni di Mario Fois sull'approccio sistemico al progetto: "L'approccio sistemico piuttosto mira al raggiungimento di risultati 'sistematici'³⁸, cioè a far rilevare ad un soggetto e alla collettività proprietà emergenti che siano la combinazione di elementi di sistema etici ed estetici, in modo da produrre benefici per la società e per l'ambiente naturale. Le qualità formali di un progetto sistemico sono quindi potenzialmente 'sistetiche', e lo diventano effettivamente quando un insieme di realizzazioni materiali riesce a raggiungere una sintesi tra eleganza formale e risultati eticamente sostenibili [45]".

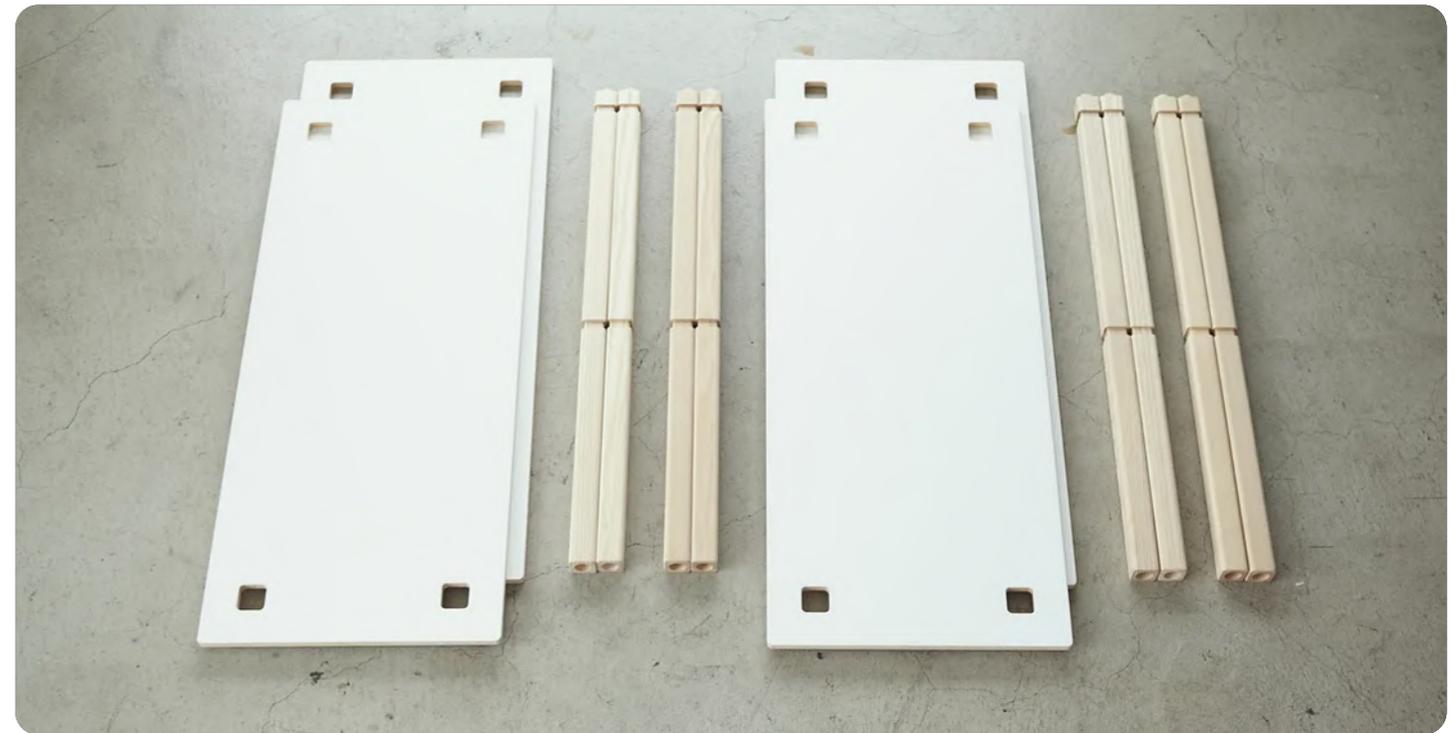
37. Pensiero teorizzato da Lloyd Morgan (1852-1936), biologo inglese che scrisse: "A diversi gradi di organizzazione, le configurazioni materiali esibiscono fenomeni nuovi e inaspettati, e questi includono le caratteristiche più salienti del meccanismo adattativo [61]".

38. Un estratto dal libro 'Systemics of Incompleteness and Quasi-Systems' definisce bene questo concetto: "Un progetto può definirsi 'sistetrico' quando è in grado di far rilevare a un soggetto (collettivo) proprietà emergenti dall'interazione dei suoi elementi costitutivi che abbiano caratteristiche inscindibili di bello e buono percepibili dallo stesso soggetto [62]".

Figura 3.14 →
Half-throttle, le tre parti separate dell'oggetto, Kohdai Iwamoto, 2013 [63].

Figura 3.15 ↓
Confezione lampada Parentesi, leggera e compatta per minimizzare l'impatto ambientale, Achille Castiglioni e Pio Manzù, Flos, 1971 [64].

Figura 3.16 ↘
Tube chair, i quattro tubi posizionati uno nell'altro per minimizzare le dimensioni per il trasporto e lo stoccaggio, Joe Colombo, Cappellini, 1969 [65].



3.7 Le nuove prospettive

Oggi, grazie alle nuove tecnologie quali la fabbricazione additiva, il concetto di giunto per forma sta conoscendo una nuova evoluzione. Questi strumenti, accostati a una progettazione generativa, permettono di realizzare giunti modulari e complessi che rispondono alle esigenze di adattabilità e personalizzazione, soddisfacendo a pieno i bisogni degli utenti senza sacrificare gli aspetti legati alla sostenibilità ambientale ed economica del progetto. Tradizionalmente i giunti per forma connettono due o più elementi senza l'uso di collegamenti accessori, ma la prototipazione rapida ha introdotto una nuova prospettiva. Oggi è possibile creare componenti accessori aggiuntivi che, pur non essendo giunti per forma in senso stretto, ne ampliano le possibilità applicative. Questa innovazione consente di adattare i giunti a forme e materiali diversi, superando i limiti produttivi del passato, quando la complessità della realizzazione rendeva difficile il loro impiego³⁹. Questi nuovi giunti eliminano la necessità di ferramenta tradizionale, offrendo soluzioni con un linguaggio tipico della fabbricazione additiva e del design generativo, che ne esalta il carattere estetico e funzionale.

39. Realizzare forme di questo tipo richiede lavorazioni complesse che possono essere fatte solo con macchine CNC industriali.



Figura 3.17
Keystones, giunto stampato in 3D che si basa sul contenimento di aste di legno, Kuniko Maeda e Mario Minale, Studio Minale-Maeda, 2014 [66].

Da un lato si assiste pertanto ad un ritorno, o forse è meglio dire una continuità, della semplicità costruttiva che ancora stimola l'esplorazione delle potenzialità nascoste in vecchi e nuovi materiali. Dall'altro, il mondo del design si muove verso le nuove tecnologie per l'artigianato contemporaneo, operanti all'interno dei Fab Lab e in ambito open source, dove il design generativo e l'Additive Manufacturing stanno rivoluzionando il concetto di giunto. L'attenzione si sposta, infatti, dalla progettazione di un singolo elemento alla creazione di famiglie di giunti attraverso processi algoritmici⁴⁰, che consentono infinite varianti. Il giunto non è più un elemento statico, ma un punto di partenza per la sperimentazione e l'evoluzione del design contemporaneo [5].

40. Si tende sempre più ad automatizzare la creazione e la modifica di elementi attraverso procedure basate su algoritmi.

Keystones

Connessione di aste per contenimento

Produttore	Studio Minale-Maeda
Designer	Kuniko Maeda, Mario Minale
Materiale	Poliamide (Nylon)
Anno	2014

Keystones consiste in una collezione di connettori stampati in 3D che uniscono vari componenti di un pezzo d'arredamento, permettendo di assemblarlo facilmente con un numero minimo di strumenti. È una soluzione versatile che può essere utilizzata per realizzare una vasta gamma di mobili, dai tavoli agli appendiabiti. La sua forma è stata ottimizzata per utilizzare il materiale solamente nei punti in cui è indispensabile, senza però intaccare la resistenza complessiva del pezzo.

Uno dei principali vantaggi è la possibilità di comprare solo il connettore, il che rimuove la necessità di spedire l'intero

mobile, contribuendo così a una logistica più sostenibile e a un impatto ambientale ridotto. Sebbene il componente possa essere teoricamente stampato in casa con una stampante FDM, le prestazioni ottenute non sarebbero paragonabili a quelle della versione originale. Keystones è infatti realizzato con tecnologie industriali a letto di polvere, e non in PLA, ma in Poliammide (PA). Il giunto resta però comunque interessante poiché con il suo sistema di fissaggio per contenimento permette di utilizzare qualsiasi tipologia di legno senza dover effettuare lavorazioni aggiuntive sui pezzi acquistati.



Figura 3.18 ↑
Keystones, giunto per tavolo nella versione con colorazione nera, Kuniko Maeda e Mario Minale, 2014 [66].

Figura 3.19 →
Keystones, giunto nella versione per appendiabiti, Kuniko Maeda e Mario Minale, 2014 [66].

Figura 3.20 →→
Keystones, giunto nella versione per tavolo, Kuniko Maeda e Mario Minale, 2014 [67].



Shukhov Stool

Connessione di aste
per opposizione e attrito

Produttore	-
Designer	Anna Strupinskaya, Alexey Ivashkevich
Materiale	PLA
Anno	2016

Il Shukhov Stool è uno sgabello ispirato alla Shukhov Tower, una torre radio iconica di Mosca famosa per la sua struttura iperbolicoide. La torre rappresenta un esempio straordinario di ingegneria e architettura, dove la forma garantisce grande resistenza con un uso minimo di materiali. Il progetto del Shukhov Stool si rifà a questa struttura, replicando la stessa estetica geometrica e leggera, ma usando il legno come materiale principale e unendo i pezzi attraverso giunti

stampati in 3D. Le giunture, progettate specificamente per questo progetto, fungono da connettori tra le componenti di legno. Grazie alla loro forma mantengono le aste in posizioni precise, creando un intreccio iperbolicoide che distribuisce il peso in modo uniforme lungo tutta la struttura. Questo tipo di connessione è cruciale per garantire la stabilità dell'insieme, che può sostenere pesi considerevoli nonostante la leggerezza complessiva del materiale usato.

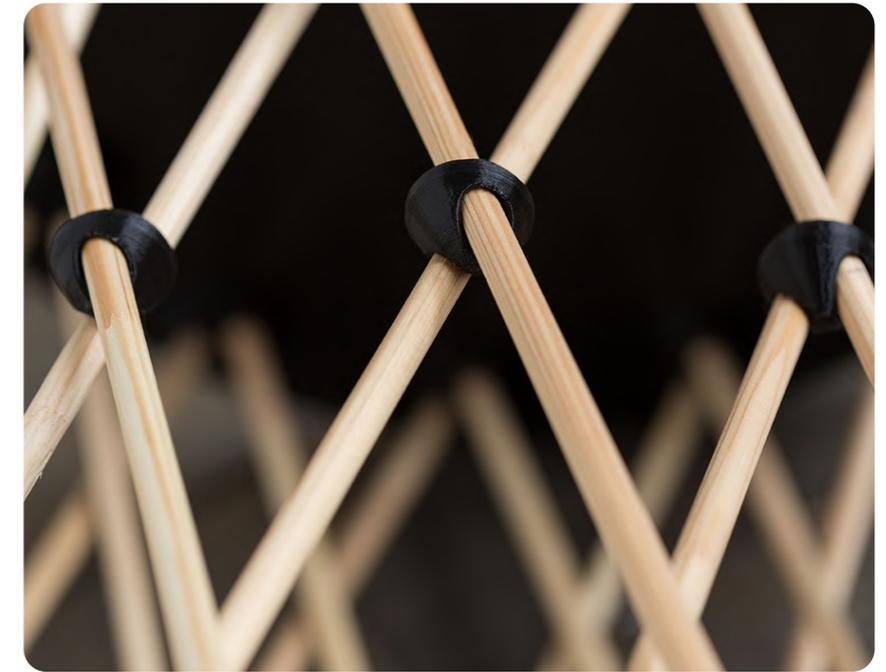
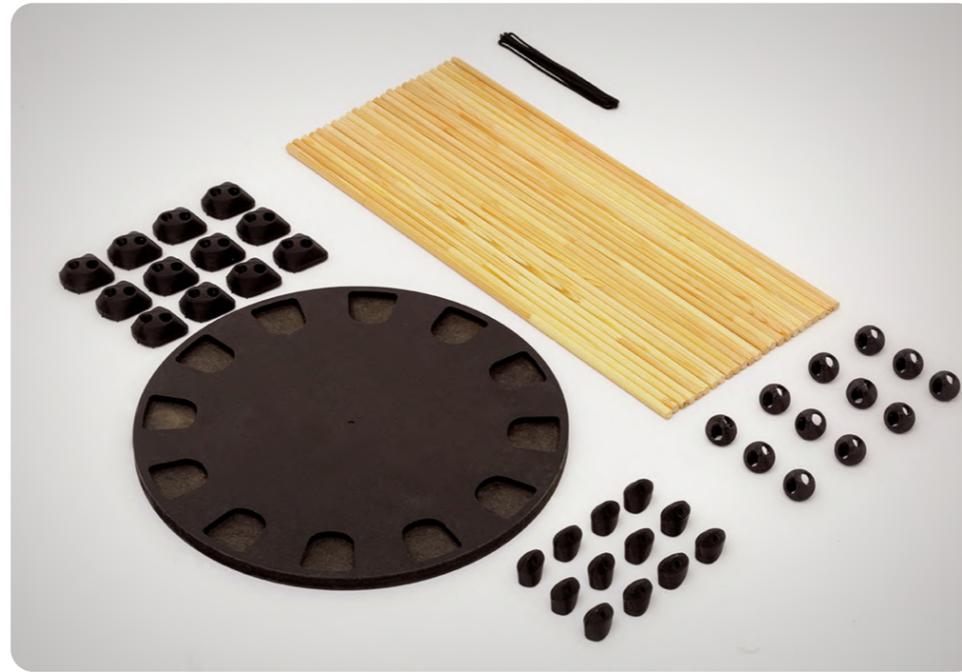


Figura 3.21 ↑
Shukhov Stool, tutti i pezzi necessari per assemblare lo sgabello, Anna Strupinskaya e Alexey Ivashkevich, 2016 [68].

Figura 3.22 ↗
Shukhov Stool, dettaglio dei giunti e del loro funzionamento, Anna Strupinskaya e Alexey Ivashkevich, 2016 [68].

Figura 3.23 →
Shukhov Stool, fase di assemblaggio dello sgabello, Anna Strupinskaya e Alexey Ivashkevich, 2016 [68].

Figura 3.24 →→
Keystones, sgabello assemblato, Anna Strupinskaya e Alexey Ivashkevich, 2016 [68].



Y construction game

Connessione in diverse
direzioni spaziali ad incastro

Produttore	Nutcreatives
Designer	-
Materiale	PLA
Anno	2015

Y è un gioco che permette di costruire strutture tridimensionali astratte, modulari e infinite, concepito per esplorare le forme geometriche in modo creativo. Il sistema è composto da due tipi di pezzi a forma di "Y" che possono essere connessi formando pattern organici che ricordano le strutture molecolari. Questo metodo di connessione risulta molto flessibile, poichè la possibilità di ruotare i componenti, permette di creare strutture che si espandono a piacimento nello spazio. Questa tipologia di incastro presenta tuttavia alcune limitazioni: la tenuta non è particolarmente robusta, il che lo rende inadatto a sostenere carichi elevati. Non a caso, si tratta di un gioco di costruzioni per esplorare strutture spaziali a partire da un'unità modulare di base.



Figura 3.25 ↗
Y construction game,
struttura autoportante
realizzata con i connettori,
Nutcreatives, 2015
[69].

Figura 3.26 →
Y construction game, fase
di incastro tra i connettori
a Y, Nutcreatives, 2015
[69].

Figura 3.27 →→
Y construction game, fase
di realizzazione con stampante
FDM domestica,
Nutcreatives, 2015 [69].



Digital Joinery Hybrid Carpentry

Connessione ad incastro generata con algoritmi

Produttore	-
Designer	Amit R. Zoran, Shiran Magrisso, Moran Mizrahi
Materiale	Poliammide (Nylon)
Anno	2017

Grazie alla progettazione assistita da uno strumento di progettazione generativa è possibile preogettare giunzioni particolari e con pochi vincoli progettuali e di produzione, aspetto limitante della falegnameria tradizionale. Il risultato è un giunto stampato in 3D che risulta molto interessante per la sua adattabilità e flessibilità. Essendo generato tramite metodi computazionali infatti, il giunto diventa un elemento in grado di adattarsi completamente e assumere infinite forme per potersi adeguare alle geometrie che unirà. Nonostante questa innovativa libertà progettuale, i complementi d'arredo realizzati per te-

stare i giunti, come ad esempio lo sgabello (Figura 3.38), finiscono per risultare l'opposto del buon design: spesso eccessivamente pesanti, complessi e intricati, con forme poco essenziali e un utilizzo di materiali ben superiore al necessario. In un'ottica di autoproduzione domestica questa tipologia di giuntura risulta poco accessibile, sia per quanto riguarda lo strumento di progettazione generativa, che non tutti sono in grado di utilizzare e gestire. Inoltre, per garantire la stambilità di questi componenti è necessario che siano realizzati in Poliammide con processi industriali a letto di polvere.



Figura 3.28 ↑
Digital Joinery Hybrid Carpentry, dettaglio del montaggio delle giunture, Amit R. Zoran, Shiran Magrisso, Moran Mizrahi, 2017 [70].

Figura 3.29 →
Digital Joinery Hybrid Carpentry, dettaglio di uno dei giunti generati, Amit R. Zoran, Shiran Magrisso, Moran Mizrahi, 2017 [71].

Figura 3.30 →→
Digital Joinery Hybrid Carpentry, Sgabello, Amit R. Zoran, Shiran Magrisso, Moran Mizrahi, 2017 [71].



3D Printed Joints

Connessione di piani con diverse inclinazioni

Produttore	-
Designer	Ollé Gellért
Materiale	PLA
Anno	2015

L'idea alla base dei giunti progettati da Gellért è quella di risolvere un problema pratico: permettere la creazione di strutture di grandi dimensioni senza la necessità di disporre di stampanti 3D di grande formato o di impiegare grandi quantità di materiale. Il principio è semplice ma efficace: invece di stampare l'intero oggetto, si producono esclusivamente i giunti, che servono a connettere elementi più grandi, realizzati in materiali economici e facilmente reperibili, come pannelli in legno o plastica. Questo approccio consente di combinare i vantaggi della stampa 3D con quelli dei materiali tradizionali, riducendo i costi e il tempo di produzione.

I giunti si distinguono per una struttura ottimizzata topologicamente che permette di ridurre il consumo di materiale. Tuttavia, il principale limite di questa soluzione è proprio legato alla leggerezza dei giunti. Infatti, essendo molto piccoli e con una struttura alleggerita, consentono di connettere solamente piani di spessore molto ridotto. Questo significa che se le strutture vengono utilizzate per sostenere oggetti pesanti, la loro resistenza risulta insufficiente e cede. Nonostante questa limitazione, il progetto di Gellért rappresenta un'interessante esplorazione delle potenzialità offerte dalla stampa 3D nel campo della progettazione e della produzione domestica.

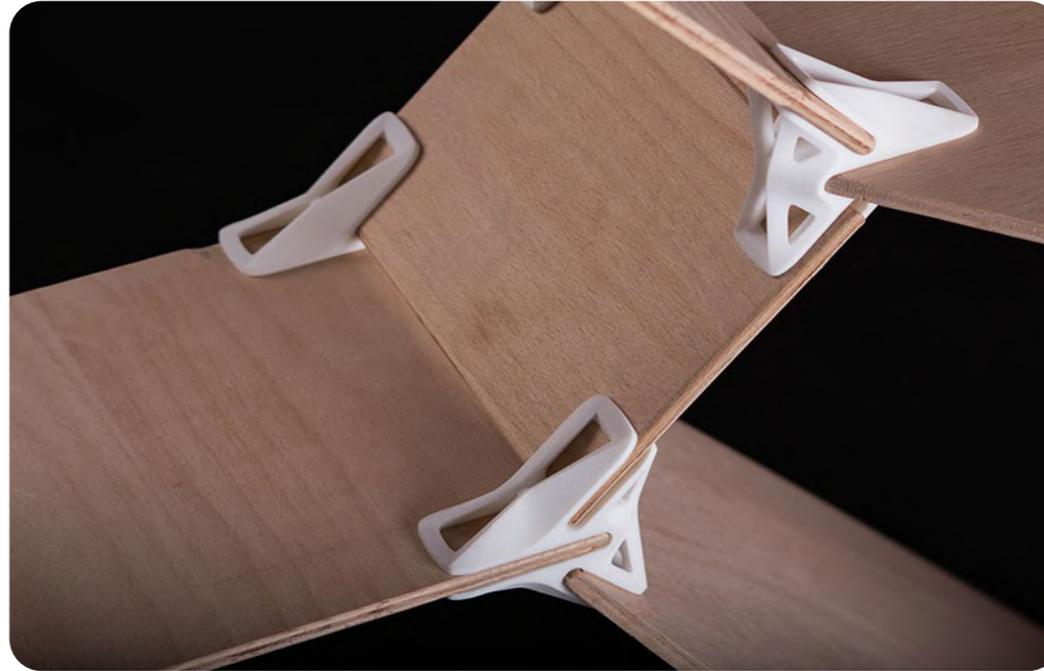


Figura 3.31 ↑
3D Printed Joints, dettaglio del giunto che collega i piani con angolo ottuso, Ollé Gellért, 2015 [72].



Figura 3.32 →
3D Printed Joints, dettaglio del giunto che collega i piani con angolo retto, Ollé Gellért, 2015 [72].

Figura 3.33 →→
3D Printed Joints, diversi giunti della collezione stampati in 3D, Ollé Gellért, 2015 [72].



Design 3.0

Connessione di aste per contenimento

Produttore	DesignLibero
Designer	Libero Rutilo, Ekaterina Shchetina
Materiale	PLA
Anno	2016

Il sistema di giuntura Design 3.0 rappresenta un approccio innovativo all'autoproduzione di arredi, combinando giunture stampate in 3D con materiali facilmente reperibili per dare vita a una famiglia di prodotti modulari. Tra questi, troviamo librerie (Figura 3.35 e 3.37), tavolini (Figura 3.34), sgabelli e appendiabiti (Figura 3.36). Il sistema Design 3.0 è stato presentato durante la XXI Triennale di Milano, all'interno della mostra "Design After Design", evidenziando il suo contributo alla riflessione contemporanea sul design e sulla produzione.

L'applicazione di questo sistema risulta particolarmente efficace nello sgabello, dove le giunture permettono di connettere le aste a sezione circolare e di appoggiare il piano, semplificando il processo costruttivo. Al contrario, lo scaffale presenta delle criticità strutturali: i piani si appoggiano esclusivamente su una sottile linguetta di materiale forata, pensata per avvitare le viti e fissare il piano al giunto. Questo sistema risulta poco affidabile, mettendo in discussione la solidità complessiva della struttura e limitandone la reale applicazione.



Figura 3.34 ↑
Design 3.0, Fase di appoggio del piano triangolare che rimane stabile per gravità, Libero Rutilo e Ekaterina Shchetina, 2016 [73].



Figura 3.35 ↗
Design 3.0, Collezione di arredi autoprodotti con giunture stampate in 3D e pezzi di legno, Libero Rutilo e Ekaterina Shchetina, 2016 [74].

Figura 3.36 →
Design 3.0, dettaglio del metodo di inserimento delle aste lignee nei giunti, Libero Rutilo e Ekaterina Shchetina, 2016 [73].

Figura 3.37 →→
Design 3.0, dettaglio del giunto che regge i piani della scaffalatura, Libero Rutilo e Ekaterina Shchetina, 2016 [73].



+ Shelf

Connessione di piani con
modulo di base a incastro

Produttore	-
Designer	Vera Shur
Materiale	PLA
Anno	2015

La scaffalatura "+" (Plus) si distingue per l'accento posto sulla modularità, grazie all'impiego di giunti stampati in 3D semplici e colorati. Il sistema si basa su un meccanismo di connessione diagonale, in cui ogni giunto collega due cubi incastrandosi nei fori presenti ai loro bordi attraverso una piccola sporgenza. Questa sporgenza risulta invisibile una volta inserita, contribuendo a un'estetica pulita e minimale.

Il prototipo presenta però alcune criticità dal punto di vista strutturale. L'incastrato, infatti, non è abbastanza profondo da garantire una tenuta stabile, rendendo necessario l'uso di colla per mantenere la scaffalatura unita. Questo problema potrebbe essere risolto con la

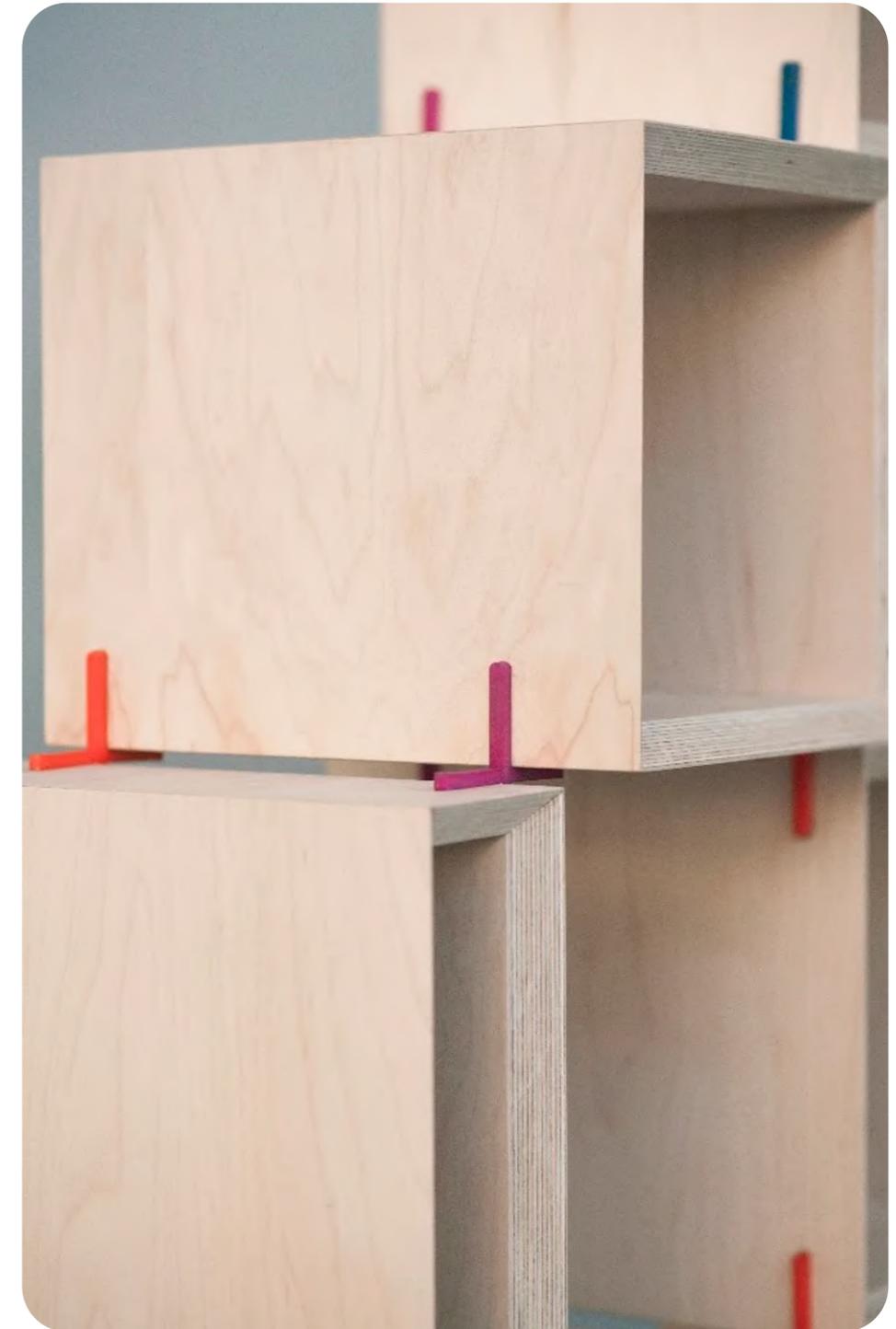
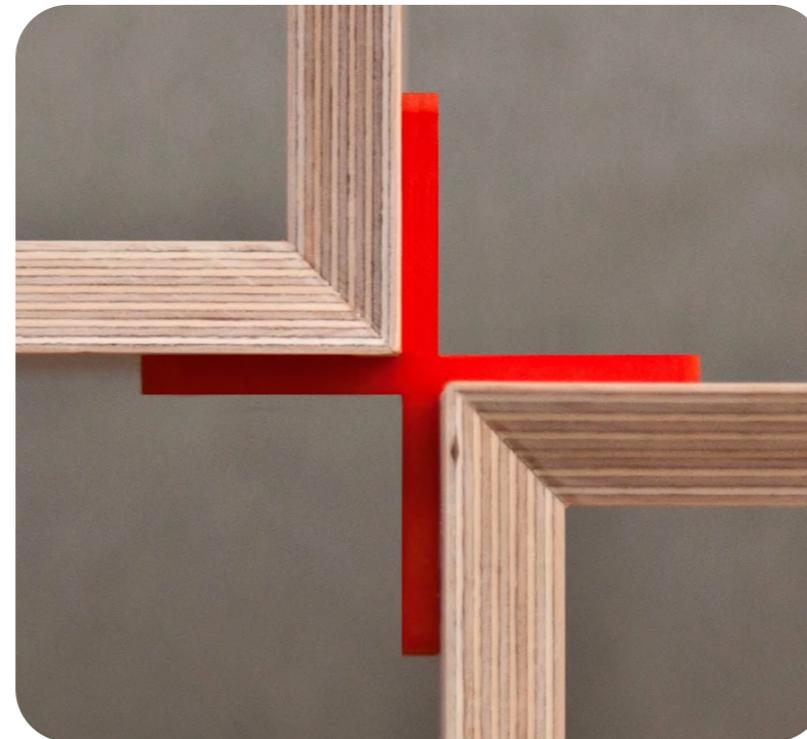
progettazione di sporgenze più lunghe che si inseriscano più in profondità nei piani. Questa modifica però renderebbe impossibile l'aggancio del giunto, poiché necessiterebbe di un'elasticità elevata del componente per poterlo agganciare, caratteristica che il PLA, soprattutto in un oggetto così piccolo e con questa geometria, non possiede. Un ulteriore limite di questa giuntura è la necessità di praticare fori nei cubi, un'operazione che aggiunge complessità alla produzione e riduce la praticità del montaggio. Nonostante queste problematiche, il concept alla base del progetto rimane interessante, soprattutto per il suo approccio innovativo all'assemblaggio modulare.



Figura 3.46 ↑
+ Shelf, dettaglio del
metodo di incastrato, Vera
Shur, 2015 [75].

Figura 3.47 →
+ Shelf, dettaglio della
vista frontale del giunto
montato, Vera Shur,
2015 [75].

Figura 3.48 →→
+ Shelf, dettaglio dello
scaffale assemblato con
i giunti a "+", Vera Shur,
2015 [75].



L'Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing offre una flessibilità unica nel produrre forme intricate e complesse, sempre più utilizzate nel design grazie all'avvento degli strumenti di progettazione computazionale. Grazie alla sua capacità di depositare materiale strato per strato, la fabbricazione additiva permette di realizzare oggetti che non sarebbero producibili con le tradizionali tecniche di lavorazione.

4

4.1 Che cos'è

L'Additive Manufacturing (AM), o manifattura additiva, rappresenta un insieme di tecnologie di fabbricazione che costruiscono oggetti strato per strato, partendo da modelli 3D digitali [76].

Questa tecnica si discosta in modo netto dai metodi di fabbricazione tradizionali, poiché è in grado di generare forme complesse e strutture particolari che rispondono in modo ottimale alle specifiche funzioni richieste dal prodotto. L'oggetto viene creato direttamente dal G-Code⁴¹, che ne definisce ogni dettaglio strutturale e dimensionale, riducendo la necessità di assemblaggio di componenti.

Questo approccio induce un cambiamento radicale nella metodologia progettuale e produttiva. Con i metodi di fabbricazione convenzionali, la realizzazione di oggetti complessi richiede tipicamente l'assemblaggio di più parti,

ognuna delle quali svolge una funzione specifica ed è collegata alle altre tramite giunzioni meccaniche o saldature, che costituiscono punti di debolezza strutturale. La produzione additiva, invece, permette di creare oggetti "unibody"⁴², ovvero composti da un unico pezzo, che possono racchiudere molteplici funzioni in una struttura unica e continua. Questo approccio offre diversi vantaggi, tra cui una maggiore solidità strutturale e un maggiore controllo sulla distribuzione del materiale nella geometria del prodotto, con un conseguente risparmio materico.

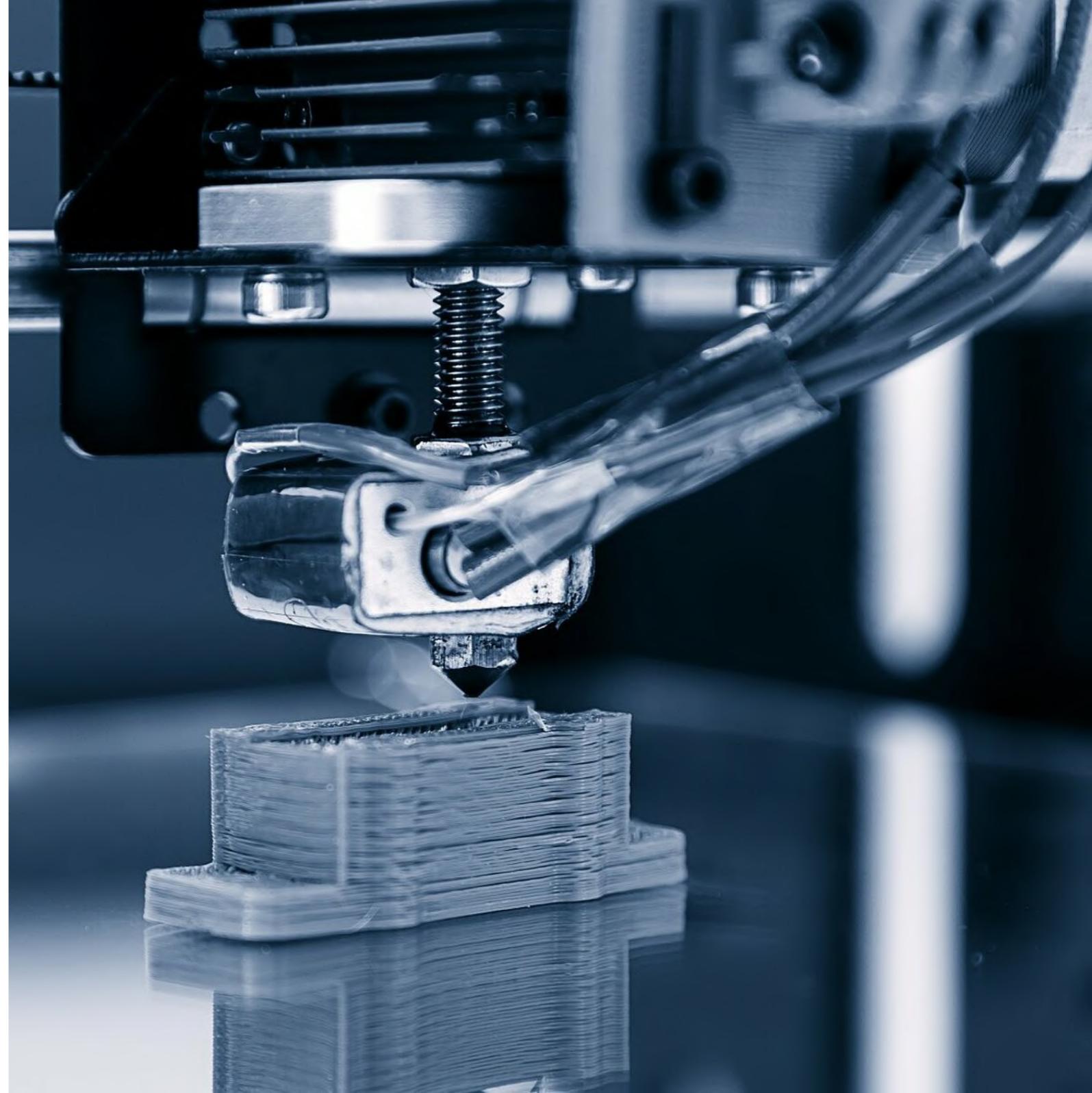
L'ulteriore vantaggio della produzione additiva è la possibilità di creare componenti con geometrie complesse, come sottosquadri⁴³, che sarebbero irrealizzabili con le tradizionali tecniche di lavorazione, quali quelle ad asportazione di truciolo o lo stampaggio [77].

41. Serie di istruzioni o comandi in un linguaggio standardizzato che indica alla stampante 3D come creare un oggetto [15].

42. Dall'inglese "corpo unico". Manufatto realizzato come un'unica struttura continua, senza assemblaggi o giunzioni.

43. Parte di un oggetto che sporge o rientra in modo tale da impedire un'estrazione diretta dallo stampo nella produzione industriale.

Figura 4.1
Processo di fabbricazione di un componente polimerico con stampante FDM [78].



La Prototipazione Rapida

Quando si parla di Additive Manufacturing, è fondamentale approfondire il tema della prototipazione rapida, una metodologia che ha trasformato in modo radicale il processo di progettazione e sviluppo dei prodotti. Si tratta di attività o processi, tradizionali o assistiti da nuove tecnologie, tesi alla realizzazione di un modello molto fedele a un sistema o a un artefatto finale, sia esso materiale o immateriale [79].

La fabbricazione additiva, concepita negli anni '80 proprio per ridurre i tempi e i costi di produzione dei prototipi, veniva inizialmente identificata con il termine stesso di prototipazione rapida. Per molto tempo, infatti, l'obiettivo principale di questa tecnologia è stato quello di realizzare modelli prototipali, consentendo agli ingegneri di valutare e ottimizzare un prodotto prima di arrivare alla sua produzione finale. Ancora oggi l'Additive Manufacturing è

la scelta primaria per la realizzazione di prototipi, poiché permette un controllo senza precedenti sui dettagli e sulle prestazioni delle parti create [77]. Grazie a questa tecnologia, la prototipazione si è trasformata in un passaggio veloce e flessibile del processo di design.

L'Additive Manufacturing è quindi il fulcro della prototipazione rapida: rendendo possibile la creazione di forme complesse in tempi ridotti e con un livello di dettaglio impensabile fino a pochi anni fa. Durante la fase di sviluppo di un prodotto, la realizzazione di prototipi assume un ruolo chiave, e viene declinata in diverse tipologie, ciascuna con obiettivi specifici e caratteristiche tecniche ben definite. I principali tipi di prototipi creati sono i prototipi concettuali, funzionali, tecnici e preserie (Tabella 5.1), ognuno dei quali svolge una funzione essenziale nel ciclo di progettazione, test e ottimizzazione del prodotto [80].

Immagine 4.2
Serie di prototipi concettuali per la valutazione della forma di un supporto per telefono. [80]

Tabella 4.1
Schema che mostra le tipologie di prototipi esistenti e le loro caratteristiche [79].

	Obiettivi	Materiale	Tecnica AM
Prototipi Concettuali	Valutazione forma	Qualsiasi	Non considerata
Prototipi Funzionali	Valutazione prestazioni	Simile	Non considerata
Prototipi Tecnici	Valutazione prestazioni e processo	Molto simile	Simile
Prototipi Pre-serie	Valutazione finale del prodotto	Definitivo	Definitiva



4.2 La storia

Nonostante la sua forte influenza nel campo della produzione industriale e del design, questa tecnologia ha una storia relativamente breve, essendo nata solo negli ultimi decenni del XX secolo.

Questo approccio rivoluzionario ha preso forma con l'invenzione di tecnologie e metodologie innovative, che hanno trasformato radicalmente il modo in cui sono concepiti e realizzati gli oggetti.



Charles Hull sviluppa lo Stereolithography Apparatus, un dispositivo che permette di creare oggetti solidi a strati tramite la polimerizzazione di resine liquide attraverso fasci di luce UV [81, 83].

1984



L'azienda 3D Systems introduce sul mercato la prima macchina commerciale, la SLA-1. Questo dispositivo consente alle aziende di creare prototipi rapidamente, riducendo i tempi di sviluppo dei prodotti [77, 85].

1987



Scott Crump inventa la tecnica Fused Deposition Modeling (FDM) e fonda Stratasys con la moglie. Brevettata il 9 giugno 1992, si differenzia perché non viene utilizzata la luce, ma viene estruso un filamento da un ugello riscaldato [81, 86].

1989



Il progetto RepRap, iniziato da Adrian Bowyer, sviluppa la prima stampante 3D open source, accessibile e riproducibile. Questo segna l'inizio della stampa 3D a basso costo per il mercato consumer, aprendo la strada alla diffusione di massa [81, 88].

2005



La NASA inizia a produrre parti per razzi e componenti aerospaziali tramite AM. Questa innovazione apre nuove prospettive per la produzione di componenti ad alte prestazioni in ambito aerospaziale [90].

2013

La stampa 3D raggiunge nuove frontiere con la fabbricazione a livello nanometrico e molecolare, utilizzando la fotolitografia e altre tecniche avanzate. Questo permette di creare strutture microscopiche con applicazioni potenziali in ambito medico e scientifico.

2021

1981

Il primo concetto di fabbricazione additiva viene sviluppato in Giappone da Hideo Kodama, che realizza un sistema di prototipazione rapida utilizzando polimeri fotosensibili solidificati tramite luce UV. Il brevetto, però, non viene depositato [81, 82].



1986

Charles Hull fonda l'azienda 3D Systems per commercializzare il suo dispositivo SLA. L'11 marzo dello stesso anno viene rilasciato il primo brevetto per una tecnologia di Prototipazione Rapida, la Stereolitografia (SLA) a opera di Charles Hull [81, 84].



1988

Carl Deckard inventa la Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS), una tecnologia che permette la fabbricazione di oggetti solidi da polveri polimeriche. Questo processo amplia le possibilità della stampa 3D, offrendo una maggiore varietà di materiali utilizzabili. Verrà brevettata solo il 28 gennaio 1997 [81, 83].



1999

In una delle prime applicazioni biomediche dell'Additive Manufacturing, il Wake Forest Institute for Regenerative Medicine stampa una struttura di tessuto bioingegnerizzato, dimostrando il potenziale della tecnologia per la medicina rigenerativa [87].



2008

Viene creata la prima protesi di gamba interamente stampata in 3D, dimostrando che la tecnologia può essere utilizzata non solo per prototipi, ma anche per prodotti funzionali e finiti [89].



2019

Cominciano a emergere le prime costruzioni edili stampate in 3D. Aziende di tutto il mondo sperimentano con la stampa di interi edifici e strutture, grazie all'uso di materiali come il cemento e altre miscele [91].



4.3 Le fasi

La fabbricazione additiva è un processo complesso che implica una serie di fasi ben definite, ognuna delle quali svolge un ruolo fondamentale nel trasformare un'idea digitale in un oggetto fisico. Queste fasi, che vanno dalla progettazione digitale alla produzione finale, richiedono tecnologie e competenze specifiche per garantire la qualità e la funzionalità dell'oggetto prodotto.

Tabella 4.2
Schema che mostra le fasi per realizzare oggetti stampati in 3D.

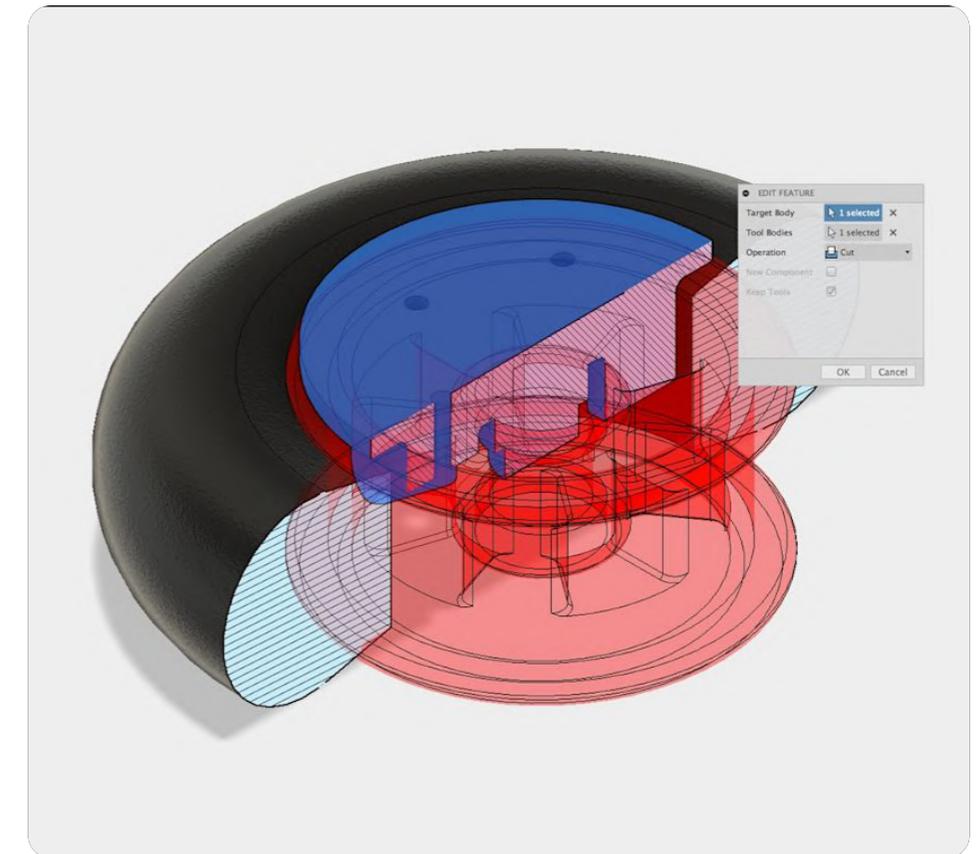


I. Modellazione CAD

La prima fase del processo di Additive Manufacturing è la modellazione, in cui viene progettato l'oggetto da realizzare. Utilizzando software CAD⁴⁴, i progettisti creano una rappresentazione digitale 3D dettagliata del modello, definendo tutte le dimensioni, la geometria e le caratteristiche specifiche del prodotto [92].

In questa fase, il progettista ha piena libertà creativa: può progettare forme complesse, strutture interne, geometrie ottimizzate per la funzionalità o l'estetica e persino integrare meccanismi mobili all'interno del modello. Ad esempio, è possibile progettare un oggetto con superfici a sezione variabile, includendo anche caratteristiche interne non visibili esternamente, o geometrie complesse. Grazie alla modellazione CAD, il progettista può ottenere un controllo totale sulle caratteristiche fisiche dell'oggetto, riducendo significativamente i vincoli rispetto ai metodi di produzione tradizionali [93].

⁴⁴ Acronimo di "Computer-Aided Design". Si riferisce all'utilizzo di software di modellazione per creare, modificare e analizzare progetti in 2D e in 3D [15].



II. Creazione file STL

Una volta che il modello CAD è stato progettato, il passo successivo consiste nel convertire il modello in un formato compatibile con le stampanti 3D. Il formato più comune è il file STL (Standard Triangulation Language), che rappresenta il modello come una serie di triangoli che definiscono la superficie esterna dell'oggetto [92]. Ogni triangolo in un file STL è descritto da tre punti nello spazio 3D e una normale⁴⁵, che rappresenta la direzione del piano del triangolo [93].

La conversione del modello CAD in un file STL può comportare alcune problematiche, come la perdita di dettagli per modelli a bassa risoluzione o la creazione di geometrie non valide che potrebbero generare errori durante la stampa. È importante che il file STL sia ottimizzato per la stampa 3D, con una risoluzione adeguata (che non sia né troppo alta né troppo bassa) per evitare problemi di dimensioni dei file o di qualità della stampa.

45. Vettore perpendicolare a una superficie o a una curva in un determinato punto (in questo caso, al centro dell'area del triangolo) [95].

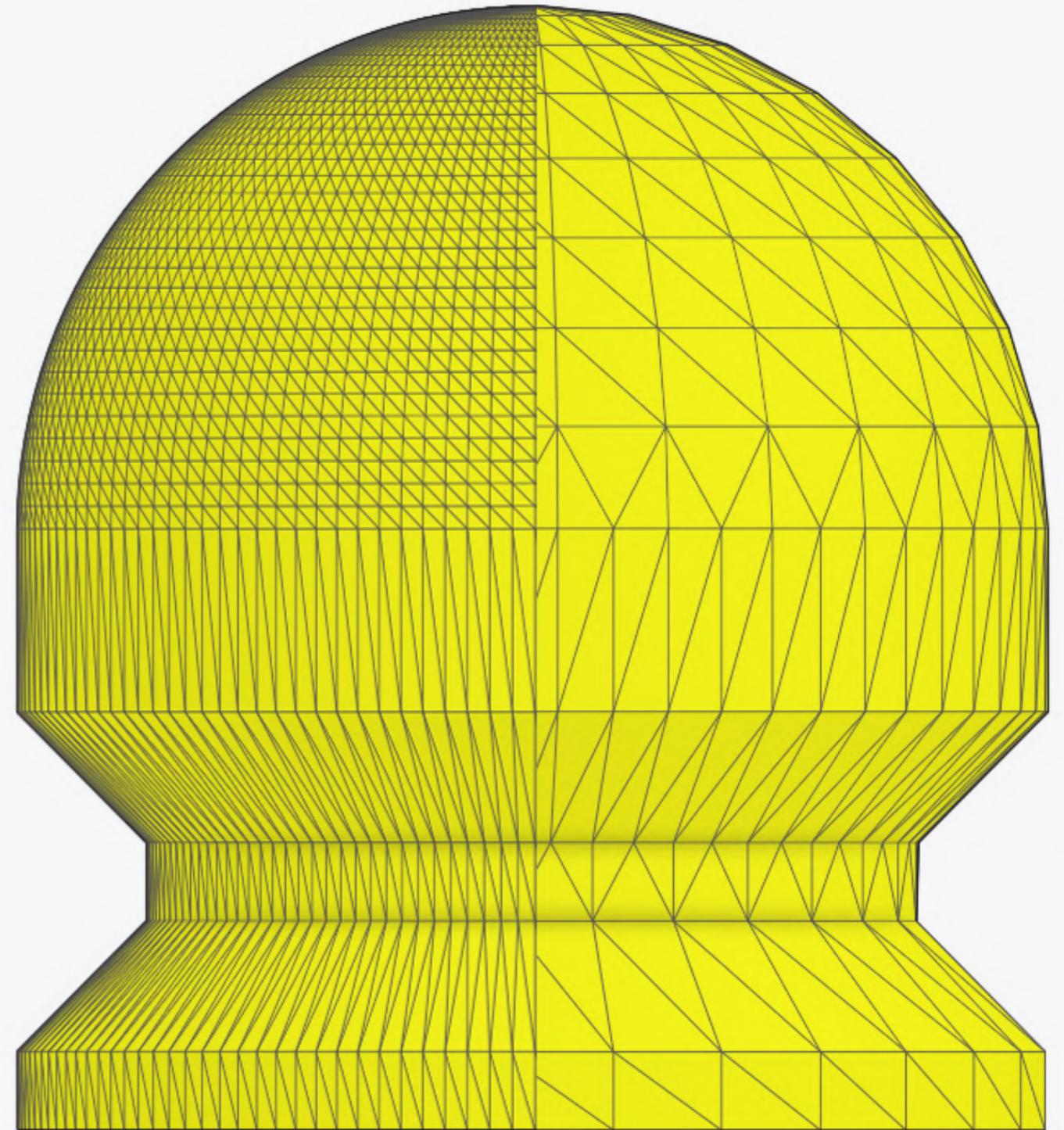


Figura 4.4
Modello 3D convertito in file STL con due diverse risoluzioni: alta risoluzione (a sinistra), con semplificazione in triangoli più piccoli e quindi maggior fedeltà al modello originale, e bassa risoluzione (a destra) che presenta una suddivisione in triangoli più grandi [96].

III. Orientamento modello

Preparato il file STL, il passo successivo consiste nell'orientamento del modello all'interno dell'area di stampa della macchina AM.

L'orientamento è un processo cruciale poiché influisce su vari fattori. Il primo riguarda la qualità superficiale della parte stampata. Un effetto comune nella stampa 3D è il cosiddetto stair-stepping⁴⁶, che si manifesta come una transizione visibile tra i singoli strati di stampa. Questo fenomeno può essere ridotto utilizzando altezze di strato più sottili o rimosso attraverso il post-processing. Però, se si ottimizza l'orientamento del modello, è possibile minimizzare questo effetto, poiché un angolo di stampa più favorevole può ridurre la visibilità delle linee di strato sulla superficie [97].

Un altro fattore importante quando si stampa una parte funzionale è che l'oggetto soddisfi le aspettative di prestazione. L'orientamento influisce direttamente sulla resistenza meccanica del pezzo, in particolare a causa delle linee di strato, che possono rappresentare punti di debolezza strutturale⁴⁷ [98].

Infine, sebbene l'orientamento non influenzi il volume complessivo della parte, ha un impatto significativo sulla quantità di materiale utilizzato e sui costi [97].

L'orientamento infatti determina la necessità o meno dei supporti⁴⁸. Queste strutture sono fondamentali per garantire che il materiale venga depositato correttamente e senza cedimenti o collassi durante la stampa. I supporti sono progettati dal software in base alla geometria del modello e vengono generati in modo che possano essere facilmente rimossi dopo la stampa. Dal momento in cui l'utilizzo del materiale è direttamente correlato al costo della parte, riducendo l'utilizzo del materiale per i supporti, si riduce al minimo il costo per ogni pezzo e si riducono anche i tempi [98]. Ci sono casi in cui questi fattori si contraddicono a vicenda, quindi è necessario scendere a compromessi e capire quale è la caratteristica più importante che deve avere il componente. Per questo motivo, l'orientamento corretto non è mai uno solo, ma dipende ogni volta dalla geometria del modello.

46. È il fenomeno della visibile stratificazione a scalini che si forma sulle superfici inclinate o curve di un oggetto stampato. È detto effetto "scalinata" ed è dovuto alla natura additiva del processo.

47. Questo fenomeno è noto come anisotropia e si comporta in modo simile alle venature del legno. Per ottimizzare la resistenza della parte, è quindi importante allineare gli strati in modo che le forze principali a cui sarà sottoposta agiscano in maniera parallela ad essi.

48. I supporti sono strutture temporanee che vengono utilizzate per sostenere parti del modello che non possono rimanere sospese durante la stampa.

Figura 4.5
Modello 3D posizionato in 3 diversi modi che dimostra come l'orientamento affetti il bisogno di supporti e la quantità di materiale per farli [97].

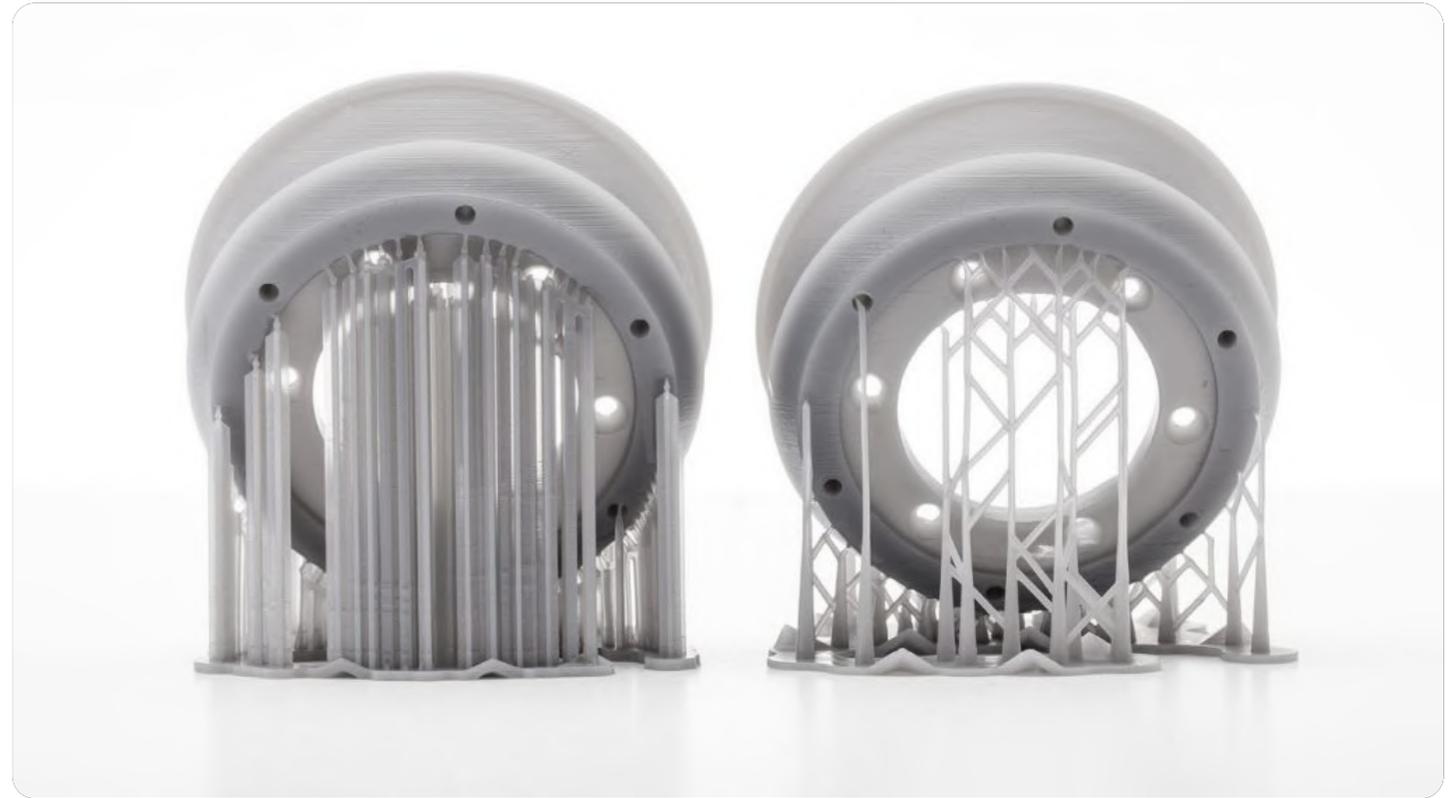
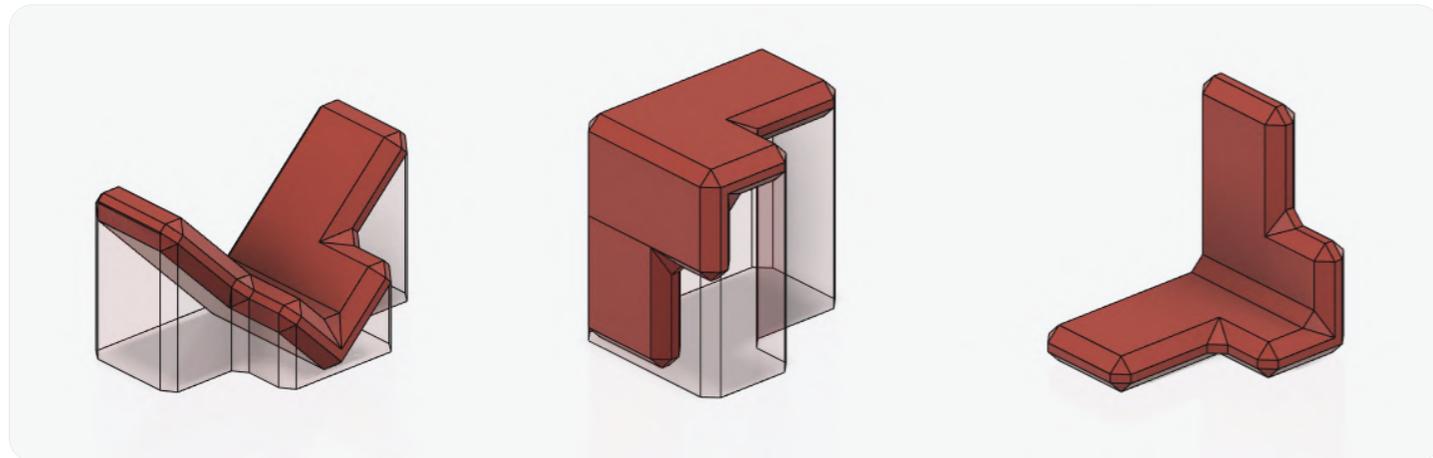


Figura 4.6
Componente stampato in materiale polimerico con due diverse strutture di supporto [99].

Esistono diverse tipologie di supporti che possono essere utilizzate a seconda della tecnologia di stampa. Normalmente sono realizzati con lo stesso materiale con cui si realizza l'oggetto, e vengono progettati con una struttura a reticolo, così da ridurre la quantità di materiale necessario per crearli. In alcuni casi però, con alcune specifiche tecnologie di Additive Manufacturing, i supporti vengono realizzati con materiali solubili, come il PVA (Alcol Polivinilico)⁴⁹, diversi dal materiale con cui si realizza l'oggetto. Così facendo, immergendo il modello in acqua o in soluzioni chimiche, questi supporti si dissolvono consentendo una rimozione molto più semplice, senza la necessità di interventi meccanici e senza rischiare di rompere o danneggiare il pezzo.

49. È un polimero idro-solubile comunemente utilizzato nella stampa 3D come materiale di supporto [100].

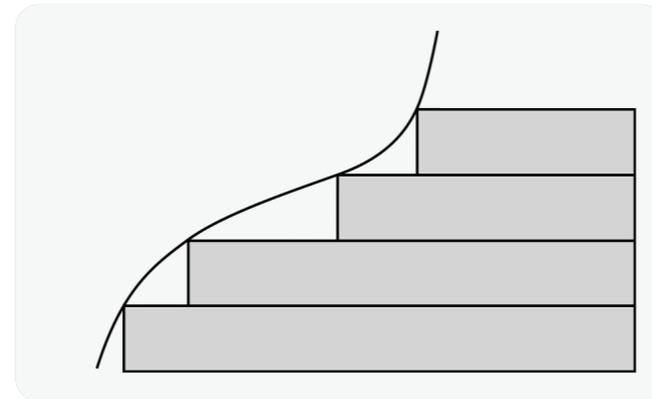


IV. Slicing

Il passaggio successivo è lo slicing, che consiste nel dividere un modello 3D in strati sottili orizzontali, ciascuno dei quali verrà stampato separatamente dalla stampante. Ogni strato rappresenta una sezione del modello e, quando tutti gli strati vengono stampati e sovrapposti, formano l'oggetto finale. Il termine "slicing" deriva proprio da questa operazione di "affettare" il modello digitale in strati distinti [93].

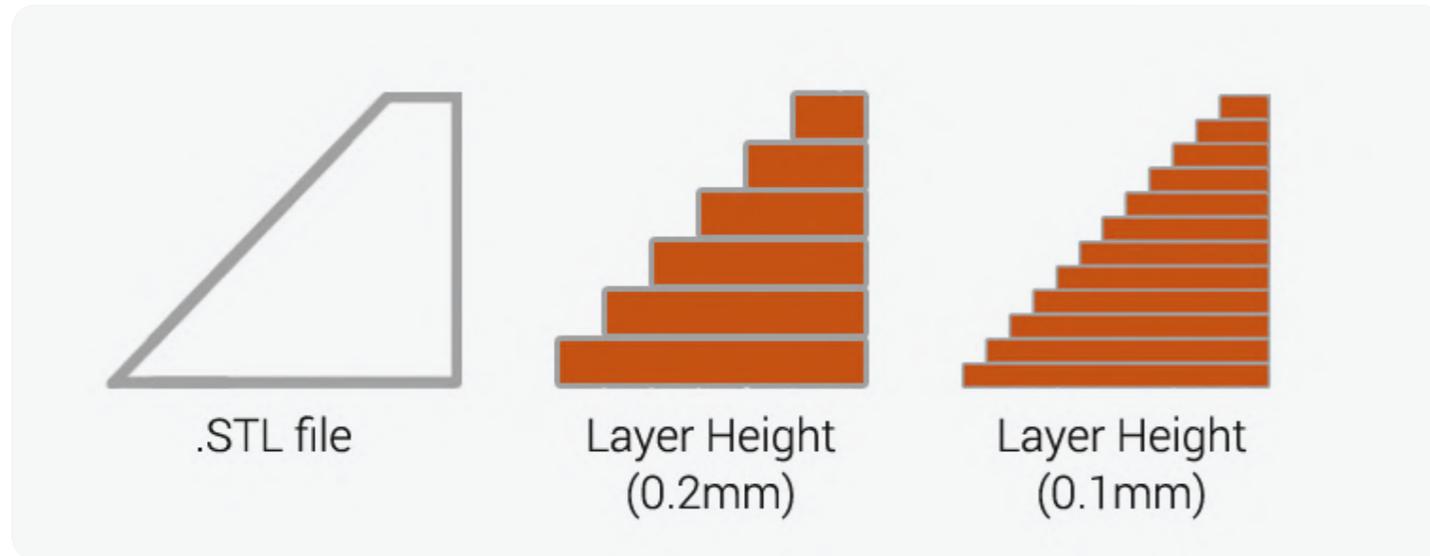
Questo processo viene realizzato tramite software appositi, programmati per prendere il modello STL (o altri formati compatibili) e tradurlo in una sequenza di istruzioni per la stampante.

Lo spessore dello slicing può variare, con un intervallo di valori determinato dalle capacità dimensionali della stampante. Più gli strati sono sottili, maggiore è la precisione del modello, poiché diminuisce l'effetto di stair-stepping.



↓ **Figura 4.7**
Sezioni di costruzione di un modello 3D in seguito allo slicing e profilo del modello CAD di partenza.

↓↓ **Figura 4.8**
Modello 3D in STL e due sue versioni con altezze differenti degli strati [98].



V. Costruzione

A questo punto, il modello è pronto per essere stampato strato su strato. Questo è il cuore del processo di Additive Manufacturing, la costruzione vera e propria, dove ogni singolo strato del modello viene realizzato dalla stampante. Ciascun livello è una replica precisa delle sezioni del modello, e la qualità della stampa dipende dalla precisione con cui il materiale viene depositato e solidificato [93]. Durante questa fase, la stampante può anche implementare tecniche di raffreddamento o indurimento per garantire che ogni strato si solidifichi correttamente prima che il successivo venga applicato. Il processo continua fino a quando il modello completo non è stato costruito interamente, strato dopo strato.

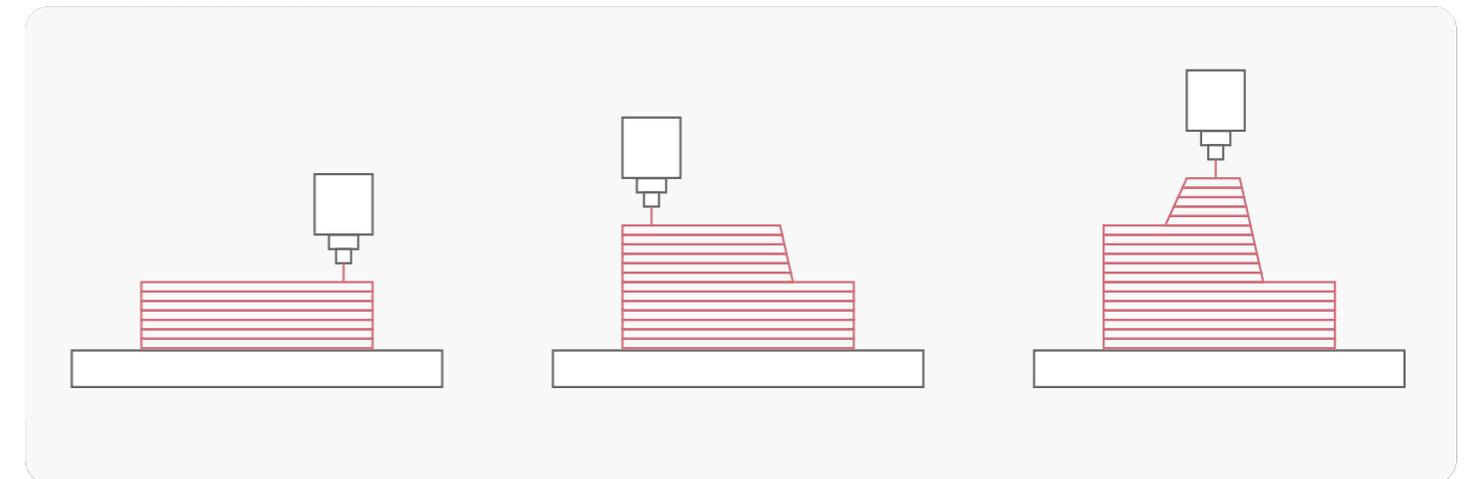


Figura 4.9
Schema che mostra come vengono fabbricati i componenti con l'Additive Manufacturing [101].

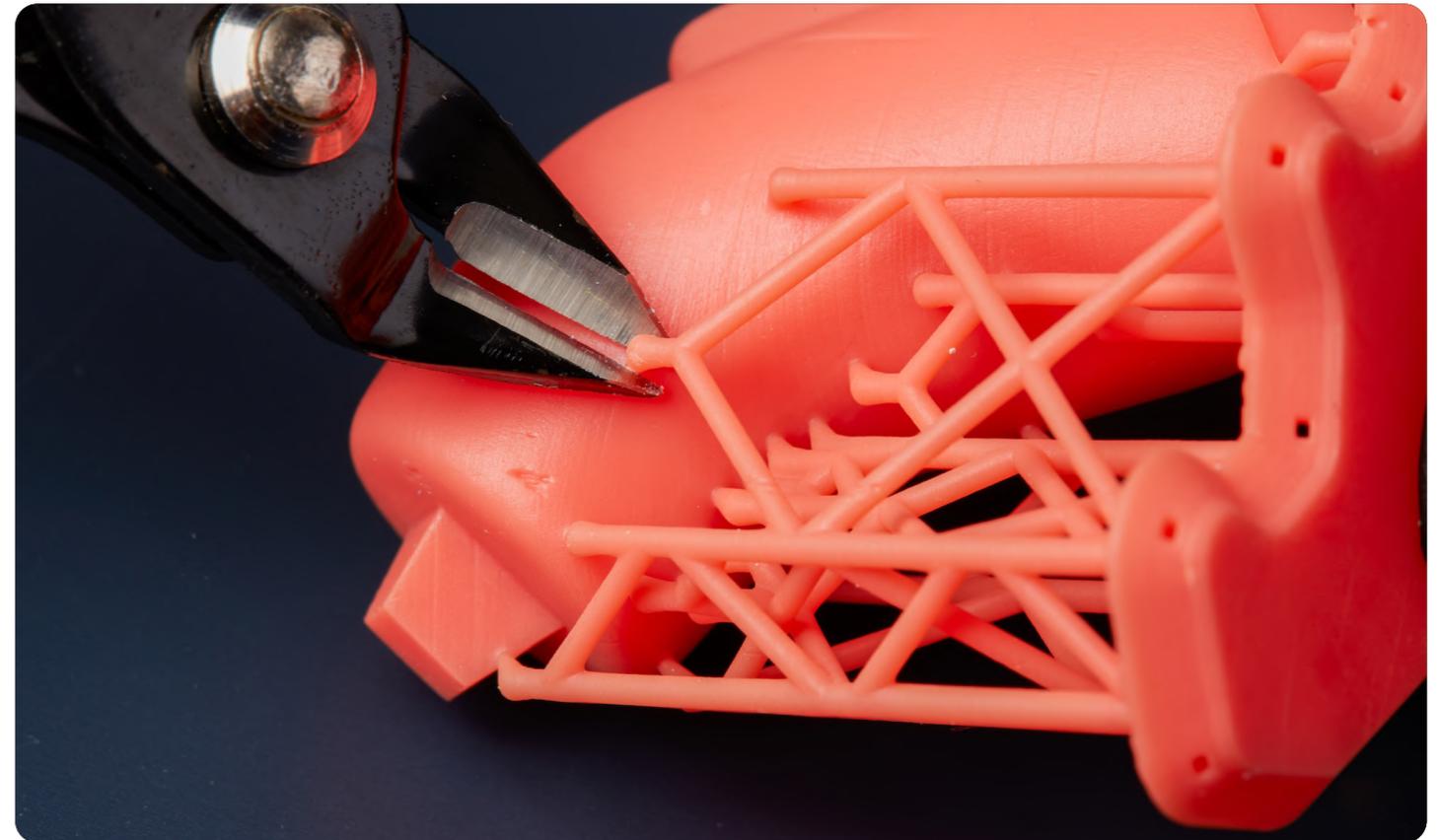
VI. Post-Processing

Una volta che la stampa è completata, l'oggetto deve passare attraverso il post-processing, che include vari passaggi per migliorare l'aspetto finale, la funzionalità e la qualità del prodotto [99].

Rimozione dei Supporti

I supporti generati durante la fase di orientamento vengono rimossi con attrezzi appositi. I supporti solidi, ad esempio, devono essere rimossi manualmente con attrezzi come pinzette, scalpelli o tronchesine, mentre quelli solubili vengono dissolti in una soluzione chimica o in acqua, a seconda del materiale utilizzato. Questo processo deve essere eseguito con cura per evitare danni al modello.

Figura 4.10
Fase di rimozione dei supporti tramite tronchesine [102].



Pulizia

Dopo la rimozione dei supporti, l'oggetto potrebbe contenere residui di materiale o polvere al loro interno che necessitano di essere puliti. A seconda della tecnologia di stampa utilizzata, la pulizia può essere effettuata con strumenti ad aria compressa, ultrasuoni o spazzole [93]. In diverse tecnologie, una delle tecniche più comuni di pulizia per rimuovere le polveri in eccesso è la sabbiatura⁵⁰.

50. Processo di finitura che consiste nel proiettare un getto di materiale abrasivo (come sabbia o vetro) ad alta velocità contro la superficie di un oggetto [103].



Figura 4.11
Fase di pulizia tramite sabbiatura [104].

Finitura Superficiale

In molti casi, l'oggetto stampato in 3D richiede operazioni di finitura per migliorarne l'aspetto estetico o per ottimizzare le sue proprietà meccaniche [77]. Le finiture possono includere la levigatura, la lucidatura, la verniciatura, o l'applicazione di rivestimenti speciali [93]. In alcuni casi, può essere necessario trattare termicamente⁵¹ il pezzo per rafforzarlo o per migliorare la sua resistenza al calore e alle sollecitazioni.

51. Insieme di processi industriali che prevedono il riscaldamento e il raffreddamento controllato di un materiale per modificarne le proprietà meccaniche, fisiche o strutturali [105].



Figura 4.12
Tecnica di finitura vibratoria, in cui il componente è immerso in una vasca con pietre abrasive [101].

4.4 Tecniche esistenti

L'Additive Manufacturing racchiude una grande varietà di tecnologie, ognuna delle quali si distingue per le modalità di costruzione, i materiali utilizzati e le applicazioni specifiche a cui è destinata. Per fare chiarezza in un panorama così variegato, le tecniche di Additive Manu-

facturing vengono classificate in base al processo produttivo tramite cui danno forma all'oggetto strato dopo strato. Dal momento in cui il progetto farà uso di tecniche FDM casalinghe, l'analisi è incentrata sulla tecnica additiva di Material Extrusion.

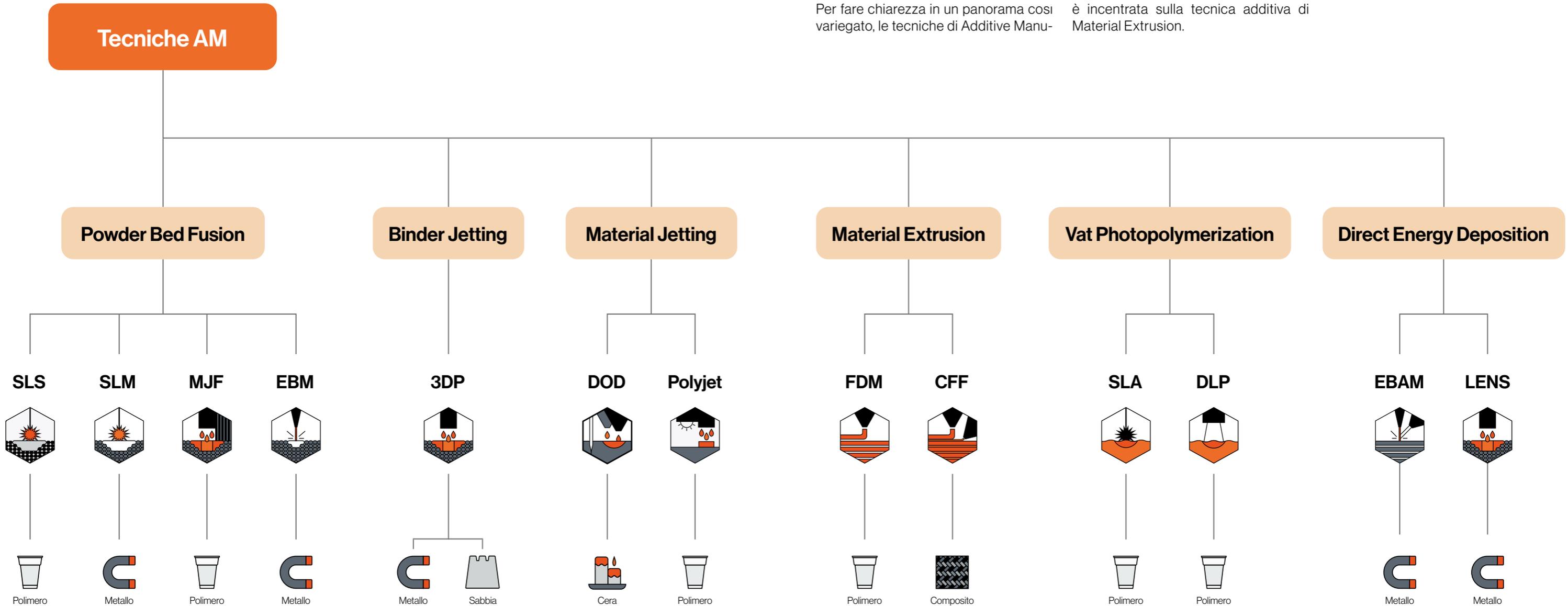


Tabella 4.3
 Tabella che riassume le tecniche di Additive Manufacturing in base al funzionamento [106].

Material Extrusion

Funzionamento

La tecnologia Material Extrusion è un processo di che costruisce oggetti strato per strato mediante l'estrusione di un materiale termoplastico fuso. Durante il funzionamento, un filamento solido di materiale viene riscaldato all'interno di un estrusore fino a raggiungere lo stato semi-liquido, dopodiché viene depositato con precisione sulla piattaforma di costruzione attraverso un ugello [101]. Il materiale si solidifica rapidamente dopo essere stato estruso, formando uno strato stabile (Figura 4.13).

La piattaforma di costruzione si muove verso il basso man mano che ogni strato viene completato (Figura 4.14). È la tecnica di produzione additiva più conosciuta. Grazie alla sua accessibilità e ai costi relativamente bassi, questa tecnologia è diventata infatti quella su cui si basano le stampanti 3D domestiche. Nonostante questo, rimane comunque una netta differenza tra le macchine industriali per l'AM e le stampanti a basso costo in termini di precisione, prestazioni, dimensioni e qualità dei materiali.

Materiali

Polistirene, poliammide, polimeri biodegradabili (PLA), elastomeri termoplastici (TPU), ABS, PC, PETG, compositi (polimeri rinforzati con fibre di carbonio, kevlar, vetro) [93].

Applicazioni

Prototipi concettuali, dispositivi di supporto come maschere e dime, componenti definitivi e stampi pre-serie, prototipi funzionali (con materiali ad alte prestazioni) [93].

FDM

La tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling) rappresenta la forma più accessibile e diffusa di stampa 3D a livello mondiale, utilizzata sia a livello domestico che industriale. Si basa sull'uso di un filamento in polimero termoplastico, che viene fuso e depositato sul piano di stampa attraverso un ugello. La tecnologia FDM richiede spesso la creazione di strut-

ture di supporto per consentire la stampa di geometrie complesse o parti con sporgenze accentuate [107]. Questi supporti vengono stampati insieme al componente principale e successivamente rimossi, manualmente o tramite processi specifici, come la dissoluzione in acqua nel caso di materiali solubili (solo nel caso di stampanti dotate di più estrusori).

CFF

La CFF (Continuous Filament Fabrication) è una tecnica di produzione additiva che combina la stampa FDM tradizionale con l'aggiunta di un filamento continuo di materiale rinforzante, come fibra di carbonio, fibra di vetro o Kevlar. Durante il processo, una testina di stampa deposita termoplastici come il nylon per creare la matrice del pezzo, mentre un secon-

do ugello aggiunge il filamento continuo nei punti chiave, migliorando significativamente le proprietà meccaniche [107]. Questa tecnologia consente di realizzare componenti leggeri ma estremamente resistenti, con caratteristiche simili a quelle dei materiali compositi tradizionali.

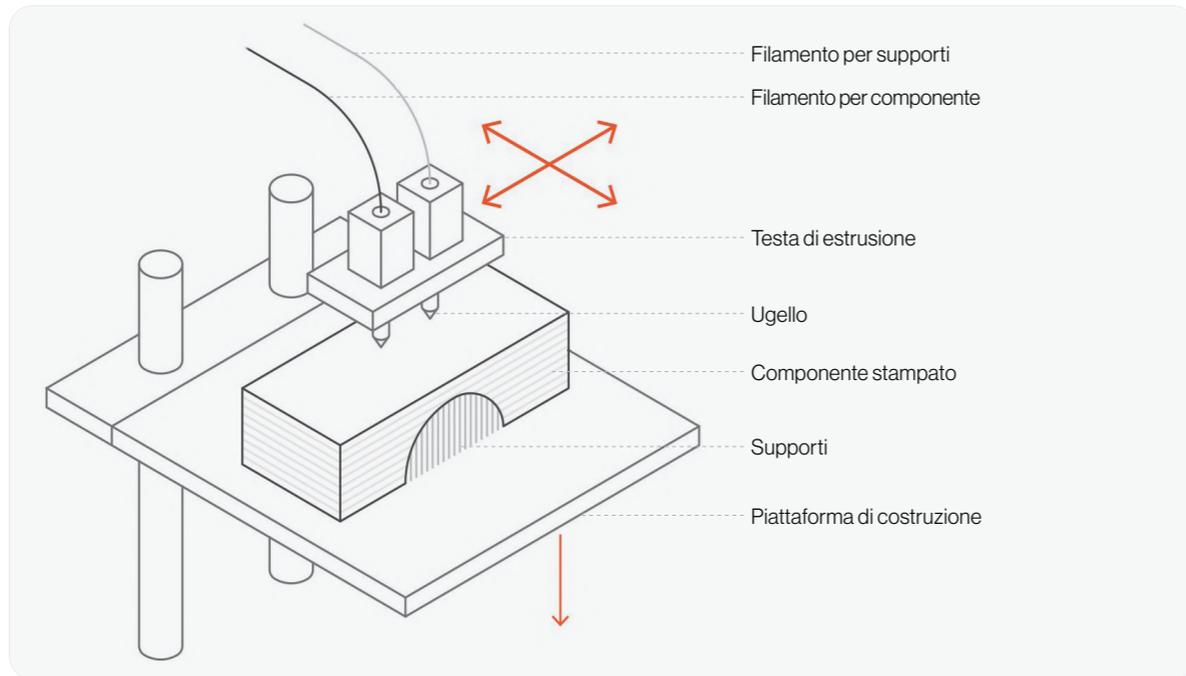
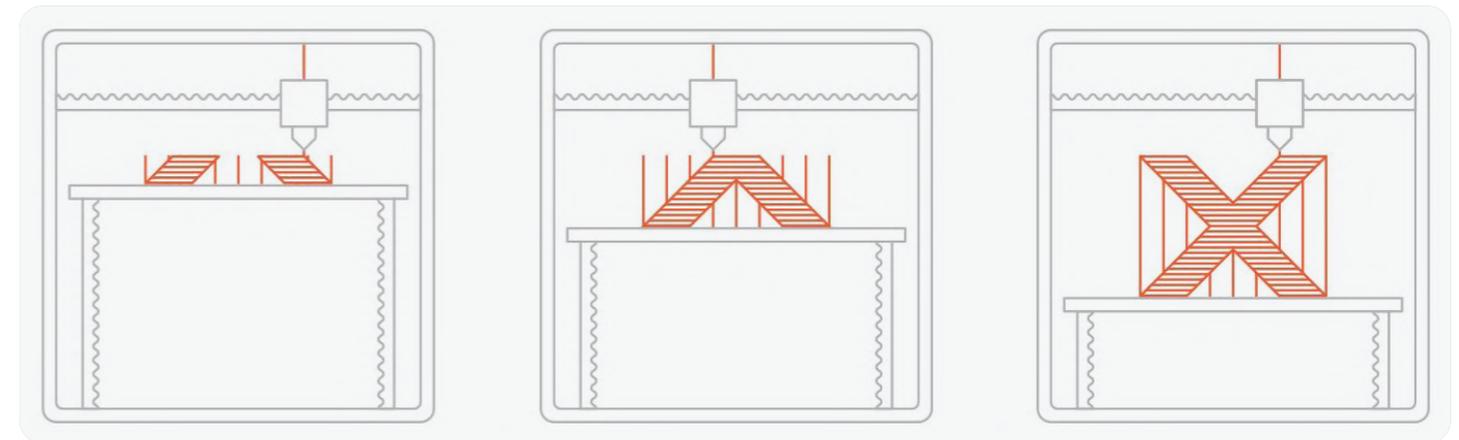


Figura 4.13
Struttura di una stampante FDM [101].

Figura 4.14
Processo di stampa FDM [101].



4.5 I materiali

L'evoluzione delle tecnologie di produzione additiva ha portato a un uso sempre più diversificato dei materiali, con un impegno costante dei produttori nel migliorare le prestazioni dei materiali esistenti e svilupparne di nuovi. Dai polimeri più economici ai metalli ad alte prestazioni, la gamma di materiali disponibili si è notevolmente ampliata, consentendo applicazioni in settori ingegneristici specifici e specializzati.

Dato che la presente tesi mira allo sviluppo di giunti per forma, concepiti per essere realizzati attraverso tecnologie di stampa 3D domestica FDM, in questo paragrafo si desidera porre l'attenzione sui materiali polimerici, in particolare il PLA. Le stampanti 3D a basso costo, ampiamente disponibili sul mercato, sono infatti concepite esclusivamente per la lavorazione di materiali plastici, mentre l'utilizzo di materiali ceramici o metallici richiederebbe apparecchiature specializzate e costose, disponibili unicamente per il settore industriale.

Polimeri

- PLA
- ABS
- HIPS
- Nylon
- PETG
- PC
- ASA
- HDPE
- PVA
- TPU
- PEEK
- Polimeri rinforzati
- Resine termoidurenti

Organici

- Cera
- Collagene

Metalli

- Alluminio
- Cobalto-Cromo
- Nichel
- Acciaio inossidabile
- Titanio
- Rame
- Bronzo
- Metalli preziosi

Ceramici

- Silica (sabbia)
- Alumina
- Grafite
- Epossidici caricati con Ceramica
- Gesso

Tabella 4.4
Elenco dei principali materiali esistenti per le diverse tecnologie di Additive Manufacturing [93].

PLA

Il PLA, o acido polilattico, è un materiale biodegradabile derivato da fonti rinnovabili come l'amido di mais o la canna da zucchero, caratteristiche che lo rendono particolarmente apprezzato per chi cerca soluzioni eco-compatibili. Questo materiale è il materiale più utilizzato nella stampa 3D domestica grazie alla sua facilità di lavorazione: il suo basso punto di fusione, generalmente intorno ai 180-220°C, e il ridotto ritiro durante il raffreddamento permettono di ottenere stampe con una buona stabilità dimensionale, riducendo il rischio di deformazioni e migliorando la qualità estetica dei pezzi finiti [108]. Le sue proprietà meccaniche, pur essendo moderate rispetto a polimeri più tecnici, risultano adeguate per una vasta gamma di applicazioni come la prototipazione rapida, la realizzazione di oggetti decorativi e l'uso in ambito educativo o creativo. Un altro vantaggio del PLA è la sua disponibilità in una vasta gamma di colori e finiture, inclusi materiali traslucidi o opachi, che lo rendono estremamente versatile per usi estetici (Figura 4.15). Tuttavia, è importante considerare le limitazioni di questo materiale: il PLA tende a deformarsi o perdere integrità meccanica quando esposto a temperature superiori a 60°C, il che lo rende meno adatto a componenti funzionali destinati a lavorare in ambienti caldi o sotto carichi prolungati.

Pro

- Basso costo
- Rigido e con buona resistenza
- Buona precisione dimensionale
- Buona conservazione

Contro

- Bassa resistenza al calore
- Il filamento può diventare fragile e rompersi
- Non adatto per esterni (esposizione alla luce solare)



Figura 4.15
Pezzi stampati in PLA di diversi colori del modello 3D Benchy [108].

	Carico di rottura	Modulo Elastico	Temperatura massima di servizio	Coefficiente di dilatazione termica	Densità	Prezzo (al kg per AM)	Metodo di stampa	Temperatura estrusore	Temperatura piano di stampa	Solubilità	Riciclabilità	Tossicità dei fumi	Uso domestico	Competenze richieste
PLA	47-70 MPa	3,3-3,6 GPa	45-55 °C	126-145 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,24-1,27 g/cm^3	10-40 \$	FDM	190-220 °C	45-60 °C	-	Si	-	Si	Base
ABS	42-46 MPa	2,21-2,62 GPa	63-77 °C	84,6-95,4 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,04-1,07 g/cm^3	10-40 \$	FDM	220-250 °C	95-110 °C	-	Si	Si	Si (solo con aspirazione)	Medio
HIPS	20-42,7 MPa	1,16-2,55 GPa	70-90 °C	77,9-81,2 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,03-1,06 g/cm^3	24-32 \$	FDM	230-245 °C	110-115 °C	Si	Si	Si	Si (solo con aspirazione)	Medio
PA	35-40 MPa	0,44-0,55 GPa	80-110 °C	140-180 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,02-1,03 g/cm^3	25-65 \$	SLS, MJF, FDM, Polyjet	220-270 °C	70-90 °C	-	Si	Si	-	Alto
PC	62,7-72,4 MPa	2,32-2,44 GPa	104-119 °C	120-125 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,19-1,21 g/cm^3	40-75 \$	FDM	260-310 °C	80-120 °C	-	Si	Si	-	Avanzato
ASA	27,6-51 MPa	1,51-2,34 GPa	53-67 °C	104-108 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,05-1,06 g/cm^3	38-40 \$	FDM	235-255 °C	90-110 °C	-	Si	Si	-	Avanzato
PP	22,5-33,5 MPa	1,37-1,58 GPa	95,1-114 °C	81,1-109 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	0,89-0,9 g/cm^3	60-120 \$	FDM	220-250 °C	85-100 °C	-	Si	-	Si	Alto
PVA	86,2 MPa	-	75 °C	85 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,06-1,23 g/cm^3	40-110 \$	FDM	185-200 °C	45-60 °C	Si	Si	-	Si	Medio
PETG	60-66 MPa	2,01-2,11 GPa	51-64 °C	120-123 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,26-1,28 g/cm^3	20-60 \$	FDM	230-250 °C	75-90 °C	-	Si	-	Si	Medio
TPU	31-62 MPa	1,31-2,07 GPa	65-78 °C	90-144 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,12-1,24 g/cm^3	30-70 \$	FDM	225-245 °C	45-60 °C	-	Si	-	Si	Medio
PEEK	70,3-103 MPa	3,76-3,95 GPa	239-260 °C	50-60 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,32 g/cm^3	200-400 \$	FDM	350-400 °C	120-150 °C	-	Si	Si	-	Avanzato
Polimeri rinforzati	297-320 MPa	29-38 GPa	107-127 °C	19 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,28-1,35 g/cm^3	30-80 \$	CFF	200-230 °C	45-60 °C	-	-	Si	-	Avanzato
Resine termoindurenti	45-89,6 MPa	2,35-2,47 GPa	122-138 °C	81-117 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,1-1,4 g/cm^3	30-70 \$	SLA, DLP	-	-	-	-	Si	Si (solo con aspirazione)	Alto

Tabella 4.5
Tabella di confronto delle principali caratteristiche dei polimeri analizzati, dati CES EduPack 2019 [109].

4.6 Design per l'AM

Il DfAM⁵² è un insieme di principi e pratiche che i progettisti devono seguire per ottimizzare la realizzazione di componenti stampati in 3D. La produzione additiva, come spiegato precedentemente, comprende diverse tecnologie, ognuna con caratteristiche ben distinte e differenti, che richiedono specifici requisiti in un progetto per poterlo realizzare [101]. Oltre alle peculiarità che dipendono da ogni tecnologia di stampa 3D, al materiale utilizzato e alla geometria del pezzo, l'aspetto sempre centrale è il costo. Un design ben ottimizzato può infatti rendere la produzione additiva molto conveniente, specialmente per forme complesse, mentre delle scelte progettuali poco attente possono aumentarne significativamente il prezzo. Nonostante la stampa 3D venga reputata un processo senza limiti, la realtà è diversa. Proprio come nelle tecniche tradizionali come stampaggio o lavorazione CNC, anche nella produzione additiva esistono vincoli progettuali che, se trascurati, possono causare il fallimento della stampa o compromettere l'affidabilità del componente in fase di utilizzo [110].

52. Acronimo di "Design for Additive Manufacturing" (in italiano, Design per la fabbricazione additiva).



Figura 4.16
Fase di progettazione
di un oggetto con test e
prove di stampa [111].

53. Processo che consente di migliorare la distribuzione del materiale all'interno di un modello 3D, al fine di ottenere una struttura con il massimo rapporto tra resistenza e peso.

Il Design for Additive Manufacturing non si limita alla stampabilità, ma introduce un nuovo approccio alla progettazione, rendendola più efficiente, economica e sostenibile. Per ottimizzare i costi e le prestazioni, oltre a linee guida rigorose, sono state sviluppate metodologie avanzate come il generative design e l'ottimizzazione topologica⁵³. Questi strumenti permettono di massimizzare l'uso dei materiali e perfezionare le geometrie, rendendo i componenti non solo più leggeri e performanti, ma anche vantaggiosi da produrre esclusivamente tramite tecnologie additive.

4.7 Vantaggi e svantaggi dell'AM

Come ogni tecnologia innovativa, l'AM porta con sé una serie di vantaggi ma anche di limitazioni. Sebbene offra soluzioni avanzate per la progettazione e la produzione, non è una panacea universale destinata a sostituire tutti i metodi tradizionali. La chiave sta nella capacità di comprendere quando sfruttarla al meglio e quando, invece, le tecniche produttive tradizionali possano risultare più efficienti. Conoscere i punti di forza e le aree di miglioramento dell'AM permette di utilizzarla in modo mirato, valorizzando le sue potenzialità senza cadere nell'errore di applicarla indiscriminatamente a ogni tipo di produzione.

Vantaggi di processo e prodotto

- Una sola macchina, forma illimitate
- Assenza di attrezzature
- Assenza di dispositivi di bloccaggio
- Sottosquadri ammessi
- Produzione decentralizzata
- Un solo step produttivo
- Riduzione degli sprechi di materiale
- Minimo intervento dell'operatore
- Tempi e costi legati solo alle dimensioni e non alla complessità geometrica
- Libertà di progettazione
- Strutture leggere (forme cave complesse)
- Parti integrate
- Design ergonomico
- Personalizzazione

Svantaggi di processo e prodotto

- Volumi di lavoro limitati
- Dimensioni dei pezzi limitate dalle dimensioni della macchina
- Velocità di costruzione limitate
- Numero limitato di materiali per ogni macchina
- Costi dei macchinari poco accessibili
- Necessità di strutture di supporto
- Finitura superficiale scarsa
- Numero limitato di materiali commerciali
- Costo dei materiali
- Non adatto a grandi produzioni seriali
- Anisotropia dovuta alla fabbricazione a strati

Tabella 4.6
Elenco dei principali vantaggi e svantaggi delle tecnologie di Additive Manufacturing [93].

Costo in funzione della complessità

Uno degli aspetti più significativi che distingue l'AM dalle tecnologie produttive tradizionali è la sua capacità di gestire la complessità geometrica senza incidere in modo sostanziale sui costi. Nelle tecniche di produzione convenzionali, come la lavorazione meccanica, lo stampaggio a iniezione o la fusione, i costi aumentano in maniera significativa con l'aumentare della complessità geometrica del pezzo. Questo è dovuto a fattori come la necessità di attrezzature specifiche, tempi di lavorazione più lunghi per realizzare dettagli complessi e un maggiore rischio di errori e sprechi di materiale. Ad esempio, uno stampo per iniezione plastica con geometrie intricate richiede progettazione e lavorazione di utensili avanzati, che comportano costi elevati sia in termini di tempo che di risorse. In AM, i costi di produzione dipendono principalmente dal volume del materiale utilizzato, il tempo di stampa e la tecnologia adottata. La complessità geometrica, invece, incide marginalmente poiché la produzione avviene strato per strato, indipendentemente dalla forma del pezzo, e non sono quindi necessarie attrezzature aggiuntive per geometrie complesse (Figura 4.17). Un aspetto rilevante da considerare è il break-even point⁵⁴, ovvero il punto in cui i costi di produzione tramite AM e metodi tradizionali si equivalgono. Mentre le tecnologie convenzionali risultano più economiche per produzioni in serie elevate di oggetti con geometrie sem-

plici, l'AM diventa vantaggiosa per basse quantità con geometrie complesse, poiché elimina i costi iniziali di attrezzature e stampi. L'indipendenza dei costi dalla complessità geometrica ha un forte impatto sul design for manufacturing (DFM)⁵⁵. Nell'additive manufacturing, il DFM diventa quindi Design for Additive Manufacturing⁵⁶, dove si incoraggia la progettazione di forme ottimizzate, spesso impensabili con metodi tradizionali [112]. Ciò porta a una riduzione del peso attraverso strutture reticolari o ottimizzate, integrazione di più funzioni in un singolo pezzo e personalizzazione senza aumento dei costi unitari. Un esempio emblematico è rappresentato dal settore aerospaziale, dove componenti complessi, come staffe o condotti con design biomimetici⁵⁶, vengono realizzati con l'AM per ridurre il peso senza compromettere le prestazioni meccaniche. Nonostante i vantaggi, ci sono aspetti che devono essere considerati, come il tempo di stampa che potrebbe aumentare con la complessità, specialmente per dettagli molto fini. Inoltre, la post-lavorazione può richiedere maggiori risorse per geometrie intricate e complesse. L'additive manufacturing, nonostante alcuni ostacoli, offre uno strumento unico in cui la complessità geometrica non è più un vincolo economico, ma diventa una risorsa progettuale, aprendo nuovi orizzonti per l'innovazione, consentendo ai progettisti di spingersi oltre i limiti delle tecnologie tradizionali.

54. Dall'inglese "punto di pareggio". È il livello di produzione in cui i costi di realizzazione di un oggetto sono equivalenti indipendentemente dalla tecnologia utilizzata, determinando il punto in cui una scelta produttiva diventa economicamente vantaggiosa rispetto a un'altra.

55. Dall'inglese "Design per la fabbricazione". Con questo termine ci si riferisce alla progettazione mirata ad ottimizzare un oggetto per la sua realizzazione attraverso le tecniche tradizionali.

56. Forme ispirate ai principi, alle strutture e ai processi della natura, dalle piante agli organismi viventi.

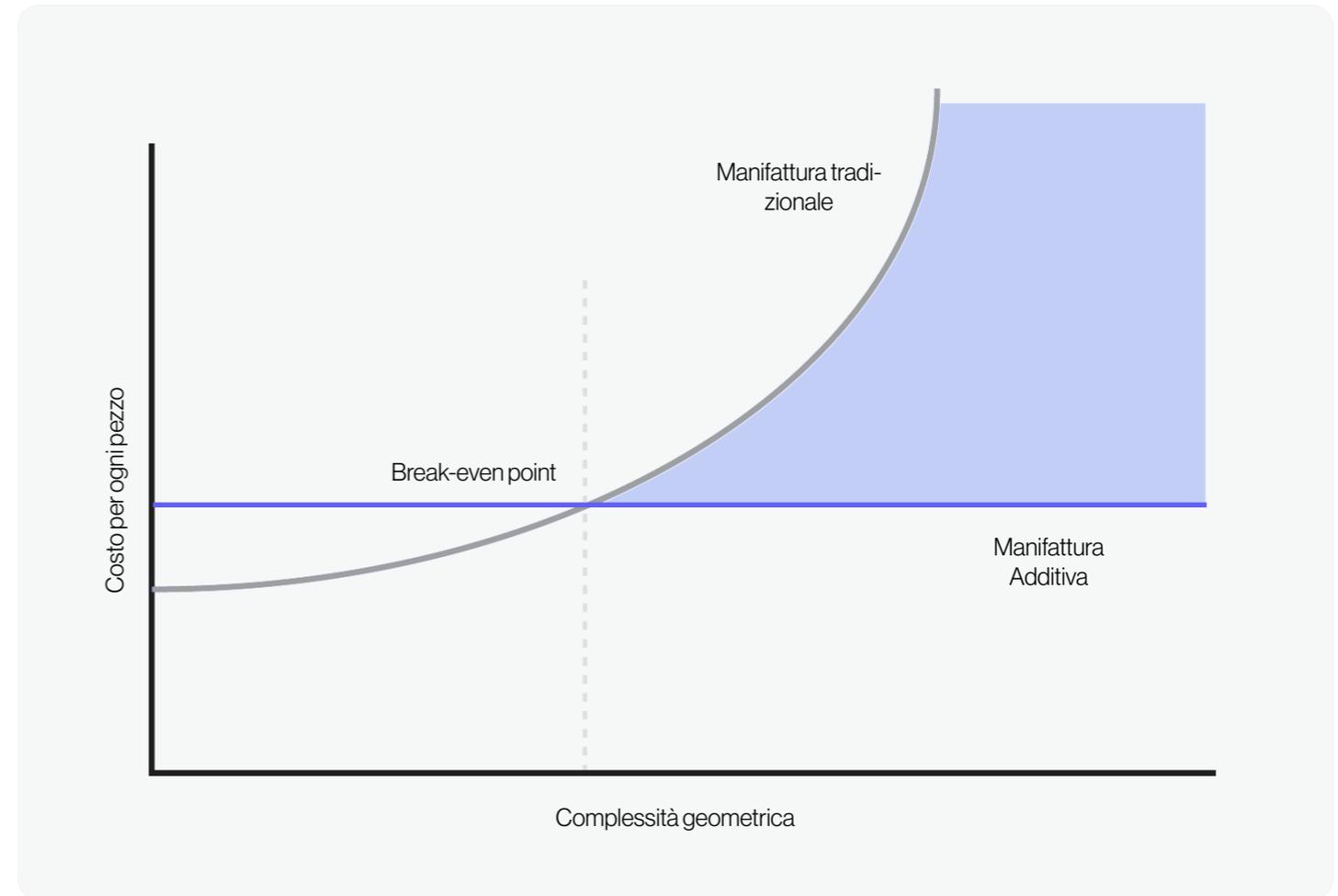


Figura 4.17

Grafico che mostra come, a differenza delle tecniche tradizionali, la manifattura additiva consenta la realizzazione di geometrie complesse senza influire sul costo [113].

Costi in base alla quantità

L'additive manufacturing offre sicuramente vantaggi significativi in termini di flessibilità progettuale e personalizzazione. Questo però non la rende sempre la soluzione ottimale: un aspetto fondamentale di cui tener conto, che ne determina la convenienza economica, è il rapporto tra costo e quantità prodotta [77]. Nelle tecnologie tradizionali come la pressofusione o quelle ad asportazione di truciolo, i costi iniziali per la realizzazione di attrezzature specifiche, come stampi e utensili, rappresentano una spesa significativa. Questi costi devono essere ammortizzati su un numero elevato di pezzi prodotti per diventare economicamente vantaggiosi, il che rende queste tecniche poco convenienti per lotti ridotti. Al contrario, l'additive manufacturing, che non richiede strumenti dedicati o stampi, elimina i costi iniziali di avvio, rendendolo estremamente competitivo per piccole serie o anche per pezzi unici. Inoltre, l'AM permette una maggiore libertà progettuale e la possibilità di personalizzare ogni pezzo senza incrementare i costi unitari.

Quando si considera la produzione su larga scala, però, il quadro cambia. I costi dell'AM rimangono relativamente invariati con l'aumentare della quanti-

tà, poiché dipendono principalmente dal volume del materiale utilizzato, dal tempo di stampa e dal consumo energetico. Al contrario, nelle tecnologie tradizionali, il costo unitario diminuisce drasticamente con l'aumentare del numero di pezzi prodotti, grazie alla riduzione dei costi iniziali e all'alta velocità dei processi produttivi. Per esempio, in un contesto industriale, la produzione di alcune decine di pezzi può essere più economica con l'AM, mentre per centinaia o migliaia di unità le tecniche tradizionali diventano decisamente più convenienti. Comprendere questa dinamica è fondamentale per scegliere la tecnologia produttiva più adatta a ciascun progetto, massimizzando i vantaggi economici e produttivi in base al contesto applicativo.

“La FA, abbinata a una (ri)progettazione per la FA, è una valida alternativa per lotti di piccole e medie dimensioni anche nel caso di componenti metallici finali. Non appena le tecnologie additive si diffonderanno ulteriormente e diventeranno processi produttivi consolidati, sarà logico supporre una diminuzione del costo orario dei sistemi di FA e di conseguenza, nel prossimo futuro, il punto di pareggio si sposterà verso volumi produttivi maggiori [114].” (Salmi, 2017)

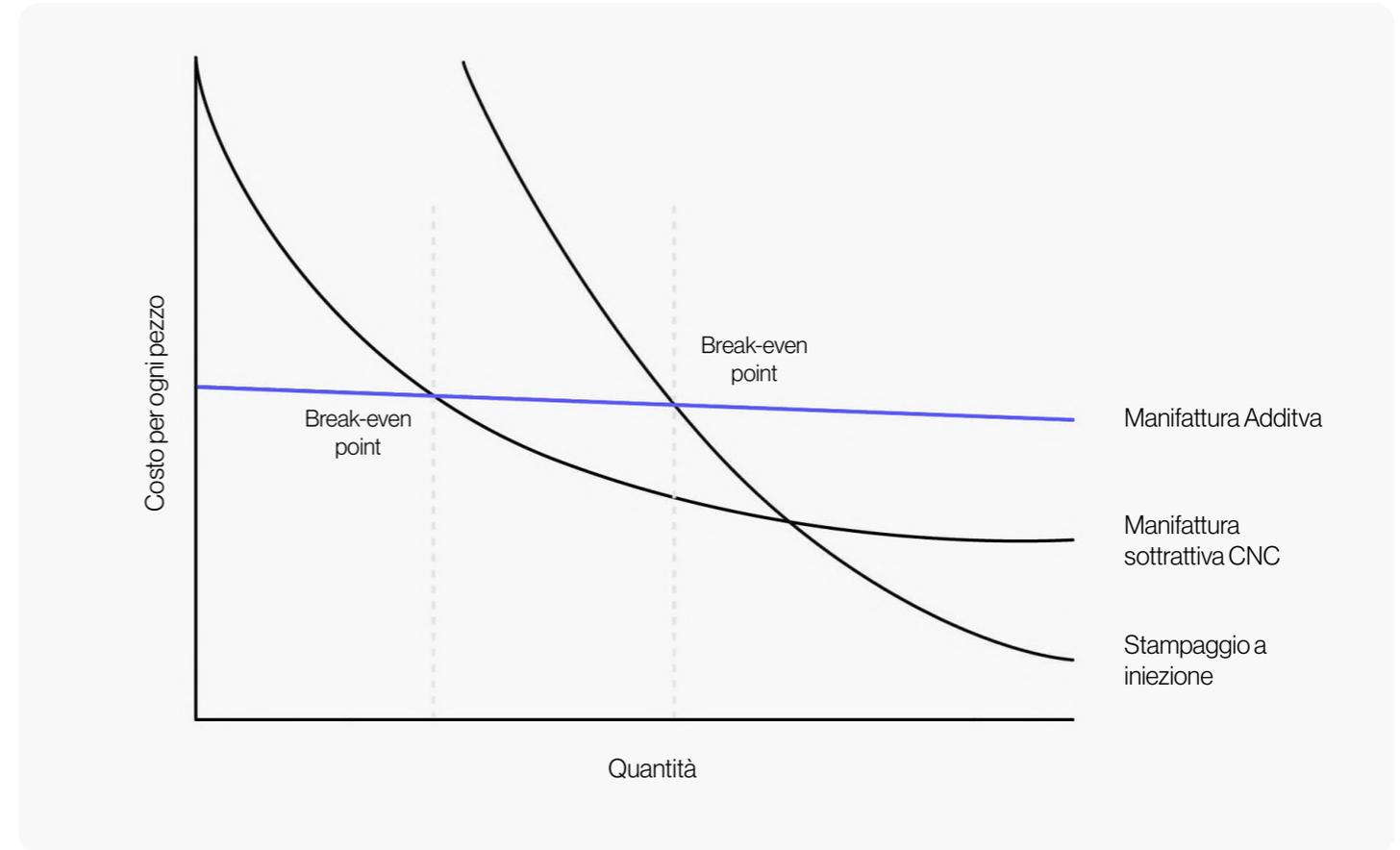


Figura 4.18

Grafico che mostra come il prezzo per le piccole serie è più basso nella produzione additiva, poiché non necessita di stampi o lavorazioni apposite (come nelle tecniche tradizionali) [77].

Sottosquadri

L'additive manufacturing, come spiegato precedentemente, ha introdotto una nuova dimensione nella progettazione e nella produzione, rendendo più agevole la gestione di caratteristiche geometriche complesse, come i sottosquadri, ossia quelle aree di un componente che risultano difficili o impossibili da lavorare con strumenti tradizionali a causa della loro posizione o geometria [115] (Figura 4.19). Questi rappresentano da sempre una sfida significativa per le tecnologie di produzione convenzionali: metodi tradizionali come la lavorazione meccanica, lo stampaggio a iniezione e la fusione richiedono spesso l'impiego di attrezzature specializzate o approcci progettuali complessi per realizzarli. L'additive manufacturing, però, elimina gran parte di queste limitazioni, offrendo una libertà progettuale senza precedenti.

La produzione strato per strato consente di creare sottosquadri senza difficoltà aggiuntive, poiché non vi è alcuna necessità di accedere fisicamente alle superfici difficili da raggiungere durante il processo [93]. Questo consente ai progettisti di concentrarsi esclusivamente sulla funzionalità e sull'efficienza del componente, senza dover considerare vincoli imposti dai processi di produzione. Tuttavia, è necessario considerare alcune limitazioni operative e tecniche: la presenza di sottosquadri complessi può infatti richiedere la formazione dei supporti durante la stampa, che devono quindi essere successivamente rimossi, aumentando i tempi di post-lavorazione. Inoltre, la qualità delle superfici dei sottosquadri può essere influenzata dalla risoluzione della macchina e dalla tecnologia di stampa utilizzata.

Figura 4.19
Rappresentazione di un oggetto lavorato per asportazione di truciolo senza sottosquadri (a sinistra) e con sottosquadri (a destra). L'immagine evidenzia la difficoltà di realizzare sottosquadri con le tecniche tradizionali (asportazione di truciolo in questo caso).

Anisotropia

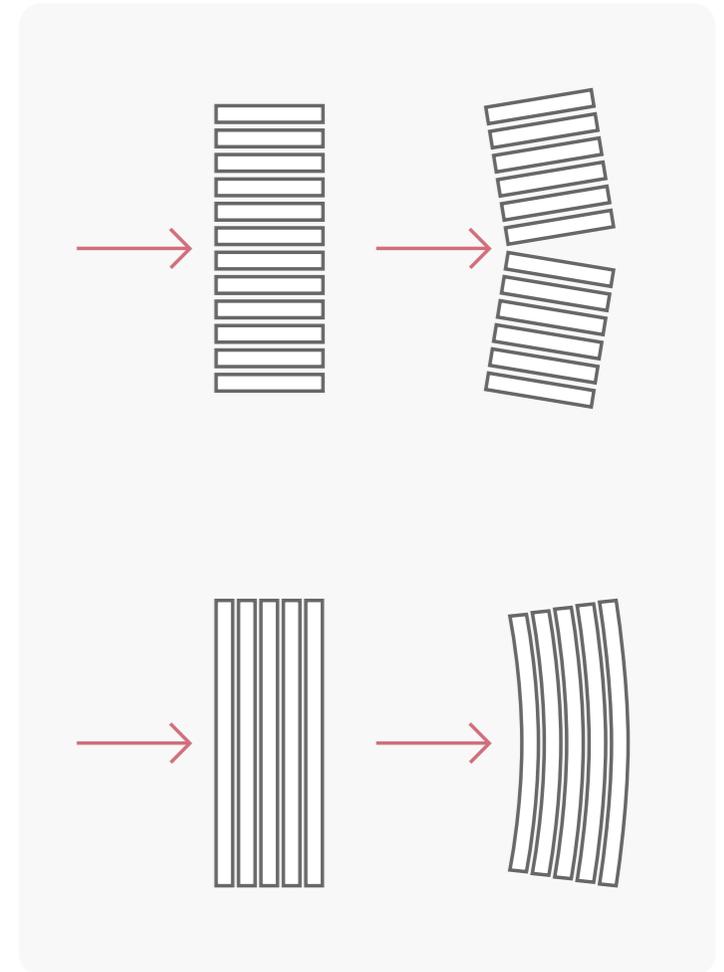
Una delle principali sfide associate alla fabbricazione additiva è rappresentata dall'anisotropia dei pezzi prodotti. L'anisotropia si riferisce alla variazione delle proprietà meccaniche in diverse direzioni all'interno di un materiale o componente.

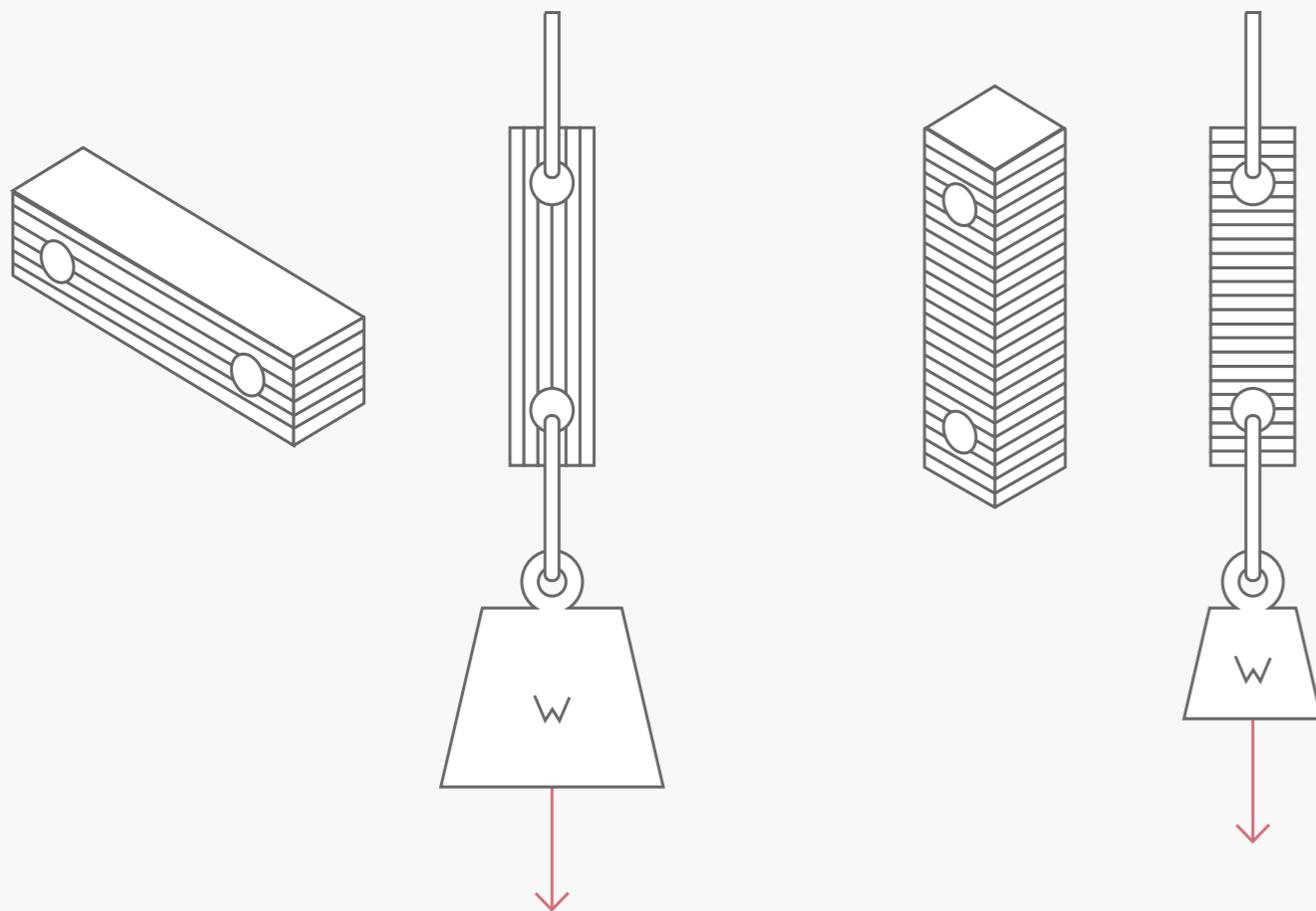
Nell'AM, l'anisotropia è una conseguenza intrinseca del processo di fabbricazione strato per strato, dove ogni nuovo livello viene sovrapposto al precedente, creando potenziali discontinuità tra di essi. Questo fenomeno può influenzare significativamente la resistenza meccanica e altre caratteristiche del pezzo a seconda della direzione in cui vengono applicati i carichi [97]. Ad esempio, i pezzi stampati possono mostrare una maggiore resistenza lungo il piano perpendicolare agli strati rispetto alla direzione parallela, dove le interfacce tra gli strati possono agire come punti deboli di moltiplicazione della sollecitazione⁵⁷ [116] (Figura 4.20).

Questo comportamento anisotropico richiede una considerazione approfondita durante la fase di progettazione e fabbricazione. I progettisti devono tenere conto delle direzioni principali dei carichi che agiranno durante l'uso del componente e orientare opportunamente il pezzo all'interno della stampante per ottimizzarne le prestazioni. Inoltre, l'anisotropia può variare a seconda della tecnologia di stampa utilizzata e dei materiali impiegati.

57. Fenomeno descritto nella teoria di Griffith sulla frattura dei materiali. Secondo questa teoria, la presenza di cricche o difetti superficiali in un materiale può amplificare localmente le sollecitazioni applicate, rendendo la struttura più vulnerabile alla propagazione delle fratture.

Figura 4.20
Rappresentazione del comportamento di un materiale anisotropo sottoposto a flessione.





↑ **Figura 4.22**

Diverse reazioni di un componente che presenta anisotropia sottoposto a carichi di tensione e flessione, evidenziando come la resistenza del materiale vari in base all'orientamento degli strati [117].

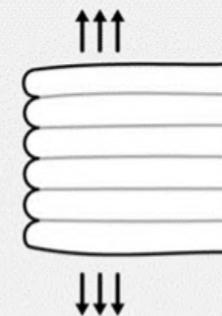
← **Figura 4.21**

Rappresentazione di due componenti uguali ma stampati con orientamenti diversi che mostra come ottimizzando l'orientamento, i pezzi possono sopportare carichi maggiori [101].

58. Proprietà del materiale che contiene una fessura o un difetto microscopico, che descrive la sua capacità di resistere alla propagazione di tale fessura, e quindi alla sua frattura [116].

59. Grandezza che quantifica la rigidità di un materiale. È la resistenza al cambiamento di forma del materiale sotto sollecitazione [116].

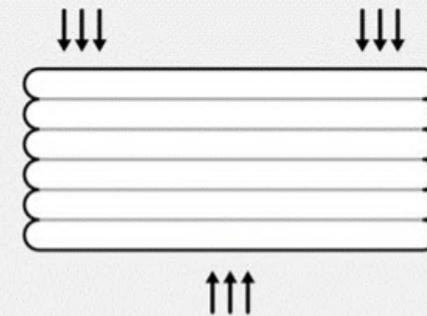
Sollecitazione di trazione perpendicolare agli strati.
Il pezzo è debole



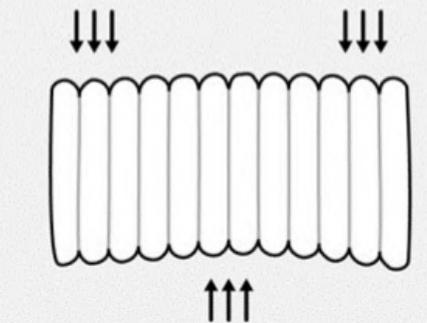
Sollecitazione di trazione parallela agli strati.
Il pezzo è forte



Carico di flessione perpendicolare agli strati.
Il pezzo è forte



Carico di flessione parallelo agli strati.
Il pezzo è debole



Anche i materiali stessi possono contribuire al fenomeno, con polimeri, metalli e compositi che mostrano comportamenti anisotropici differenti in funzione delle loro proprietà intrinseche, come la tenacità a frattura⁵⁸ e il modulo elastico⁵⁹, e delle condizioni di lavorazione. Per mitigare gli effetti negativi dell'anisotropia è possibile adottare strategie come l'uso di materiali rinforzati e l'applicazione di trattamenti termici post-stampa. Questi interventi possono migliorare l'uniformità delle proprietà meccaniche e ridurre le differenze tra le diverse direzioni. Un ulteriore approccio consiste nello sfruttare l'orientamento corretto durante la preparazione della stampa.

Orientando l'oggetto in modo ottimale, è infatti possibile controllare l'asse in cui l'oggetto sarà più debole, garantendo che le sollecitazioni principali agiscano lungo le direzioni in cui l'oggetto presenta maggiore resistenza. Sebbene l'anisotropia rappresenti una sfida, essa può anche essere sfruttata come opportunità progettuale. In alcuni casi, infatti, è possibile progettare pezzi che sfruttano le caratteristiche anisotrope per ottimizzare la resistenza o la flessibilità in determinate direzioni, adattandosi meglio alle esigenze specifiche dell'applicazione, superando le limitazioni e creando soluzioni innovative e sempre nuove.

4.8 AM domestico: la stampa 3D

Le tecnologie di Additive Manufacturing hanno subito una radicale diffusione grazie all'avvento delle stampanti 3D a basso costo basate sulla tecnologia FDM. Queste macchine, inizialmente sviluppate in ambito industriale, sono state rese accessibili al grande pubblico grazie alla combinazione di innovazioni tecniche e una sempre maggiore domanda di soluzioni per l'autoproduzione. Questa tecnologia di Additive Manufacturing ha compiuto enormi progressi, trasformandosi da una soluzione industriale costosa e complessa a una realtà accessibile per gli hobbisti e gli utenti domestici. Uno dei momenti chiave nella diffusione della stampa 3D è stato il lancio del progetto RepRap (Replicating Rapid Prototyper) nel 2005, a opera di Adrian Bowyer, un ingegnere meccanico e docente presso l'Università di Bath, nel Regno Unito. L'idea chiave era quella di creare una stampante 3D accessibile, economica e capace di auto-replicarsi, cioè di produrre molte delle proprie componenti, in modo da ridurre i costi di produzione e rendere la tecnologia disponibile a un pubblico più ampio [118].

Questo approccio non solo ha abbassato drasticamente i costi delle stampanti 3D, ma ha anche stimolato una comunità globale di appassionati. La natura open-source del progetto ha incoraggiato la condivisione di idee e innovazioni portando a una rapida evoluzione di questa tecnologia. Grazie a RepRap, la stampa 3D ha lasciato i laboratori industriali per entrare nelle case, inaugurando una nuova era per il fai da te tecnologico. Le stampanti FDM a basso costo hanno trasformato il paradigma produttivo, spostandolo da un modello centralizzato a uno decentralizzato. Con una stampante 3D domestica, gli utenti hanno potuto iniziare a realizzare oggetti personalizzati e pezzi di ricambio senza la necessità di grandi investimenti in attrezzature o infrastrutture. Questo approccio ha dato vita a una nuova economia dell'autoproduzione, in cui gli individui possono creare su misura oggetti in base a necessità specifiche, riparare parti e riutilizzare componenti allungando il ciclo di vita dei prodotti, condividere e scaricare modelli 3D pronti per la stampa grazie a diverse piattaforme open source.

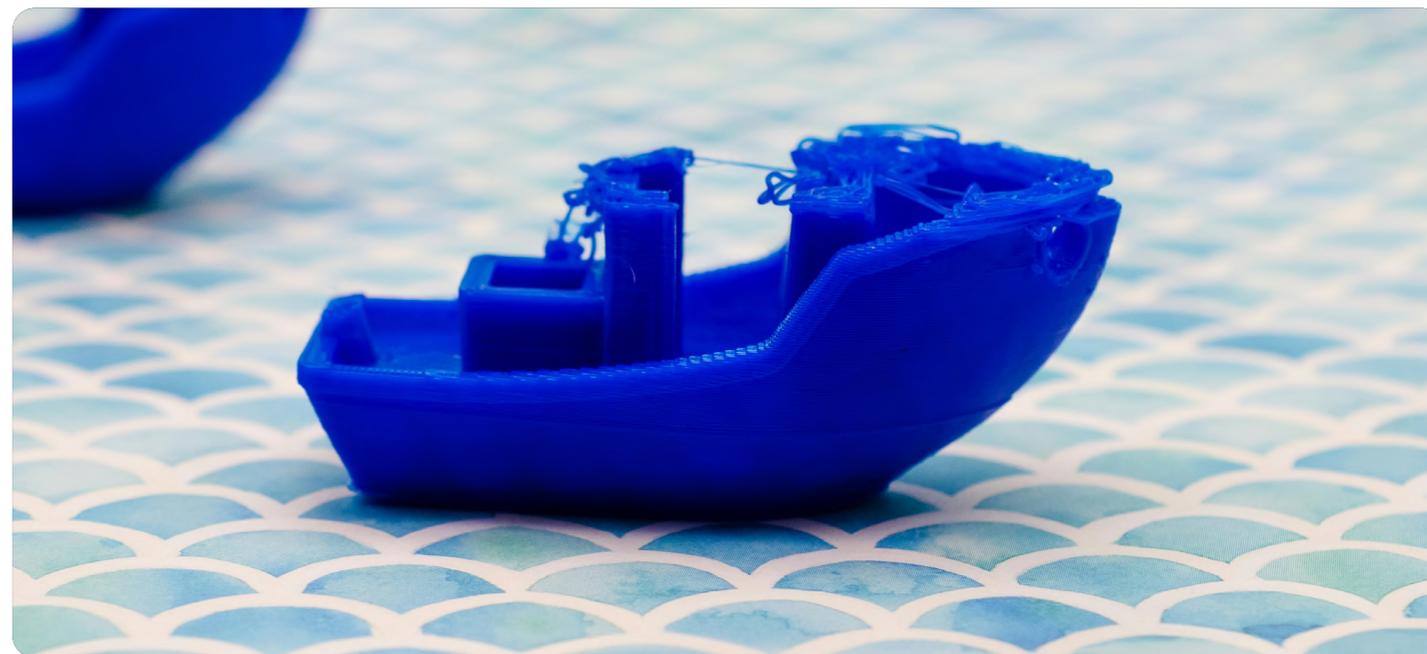


Figura 4.23
3D Benchy, il più famoso modello STL per effettuare test qualitativi delle stampanti 3D, Creative Tools, 2015 [119].

Opportunità e limiti

I progressi tecnologici di questo periodo hanno reso queste tecnologie sempre più accessibili: le stampanti 3D a filo caldo (FDM) di buona qualità possono essere acquistate per meno di 500€. Il calo dei prezzi ha aperto le porte a progetti realizzati direttamente a casa, trasformando la stampa 3D da strumento industriale a soluzione domestica. Parallelamente le dimensioni delle stampanti si sono ridotte, con modelli compatti facilmente collocabili anche in piccoli appartamenti. Questa evoluzione ha contribuito a rendere la stampa 3D un'opzione praticabile per un numero sempre maggiore di persone, ampliando la sua diffusione e il suo potenziale. Anche la disponibilità e la varietà dei materiali per la stampa 3D sono cresciute notevolmente. Il PLA, un polimero biodegradabile, resta la scelta più popolare per la sua facilità d'uso e la vasta gamma di colori e finiture disponibili (Figura 2.11), ma esistono filamenti speciali arricchiti con legno o carbonio per poter sperimentare e creare oggetti dalle texture e caratteristiche uniche. La crescente competizione tra i produttori ha inoltre contribuito a ridurre il costo dei materiali, rendendo la stampa 3D non solo accessibile ma anche economicamente conveniente per un numero sempre maggiore di utenti.

Figura 4.24
Modello non riuscito di 3D Benchy, realizzato con stampante FDM domestica, che mostra l'affidabilità non sempre elevata di questi dispositivi [120].



Sebbene la questa tecnologia offra numerosi vantaggi, la sua adozione nella vita domestica non è priva di sfide. Una delle principali difficoltà riguarda la qualità e la precisione delle stampanti per uso casalingo, che spesso non sono in grado di competere con gli standard raggiunti dalle loro controparti industriali. Questo limite può restringere il campo dei progetti realizzabili rendendo più complesso ottenere risultati soddisfacenti. Un altro aspetto di cui tenere conto è rappresentato dalle conoscenze tecniche richieste per utilizzare al meglio questa tecnologia. Contrariamente a quanto si potrebbe pensare, non basta scaricare un modello da Internet per sfruttare appieno le potenzialità di una stampante 3D; è necessario avere almeno una conoscenza di base della modellazione 3D, dei software per la preparazione dei file per la stampa e delle tecniche

di manutenzione della macchina. Senza queste competenze la stampa può risultare frustrante o poco efficiente, portando a errori e sprechi (Figura 2.12). Anche la varietà di materiali presenti sul mercato rappresenta una sfida non indifferente; infatti, sebbene filamenti come PLA e PETG⁶⁰ siano ampiamente disponibili, le loro prestazioni meccaniche sono scarse e opzioni per materiali più avanzati o specifici rimangono limitate rispetto a quelle utilizzate in ambito industriale. Inoltre, non tutte le stampanti domestiche sono compatibili con questi filamenti speciali, limitando le possibilità creative per chi desidera esplorare applicazioni più particolari. Nonostante queste difficoltà l'innovazione tecnologica sta rendendo le stampanti sempre più affidabili e lo sviluppo tecnologico sta facendo sì che anche le macchine a basso costo offrano prestazioni sempre migliori.

60. Materiale termoplastico comunemente utilizzato nella stampa 3D per la sua combinazione di facilità d'uso e buone proprietà tecniche [109]. È noto per essere più resistente e flessibile rispetto al PLA, anche se più complicato nel suo utilizzo, e perciò meno diffuso.



Figura 4.25
Rimozione di un
oggetto stampato in
3D con una stampante
FDM domestica [121].

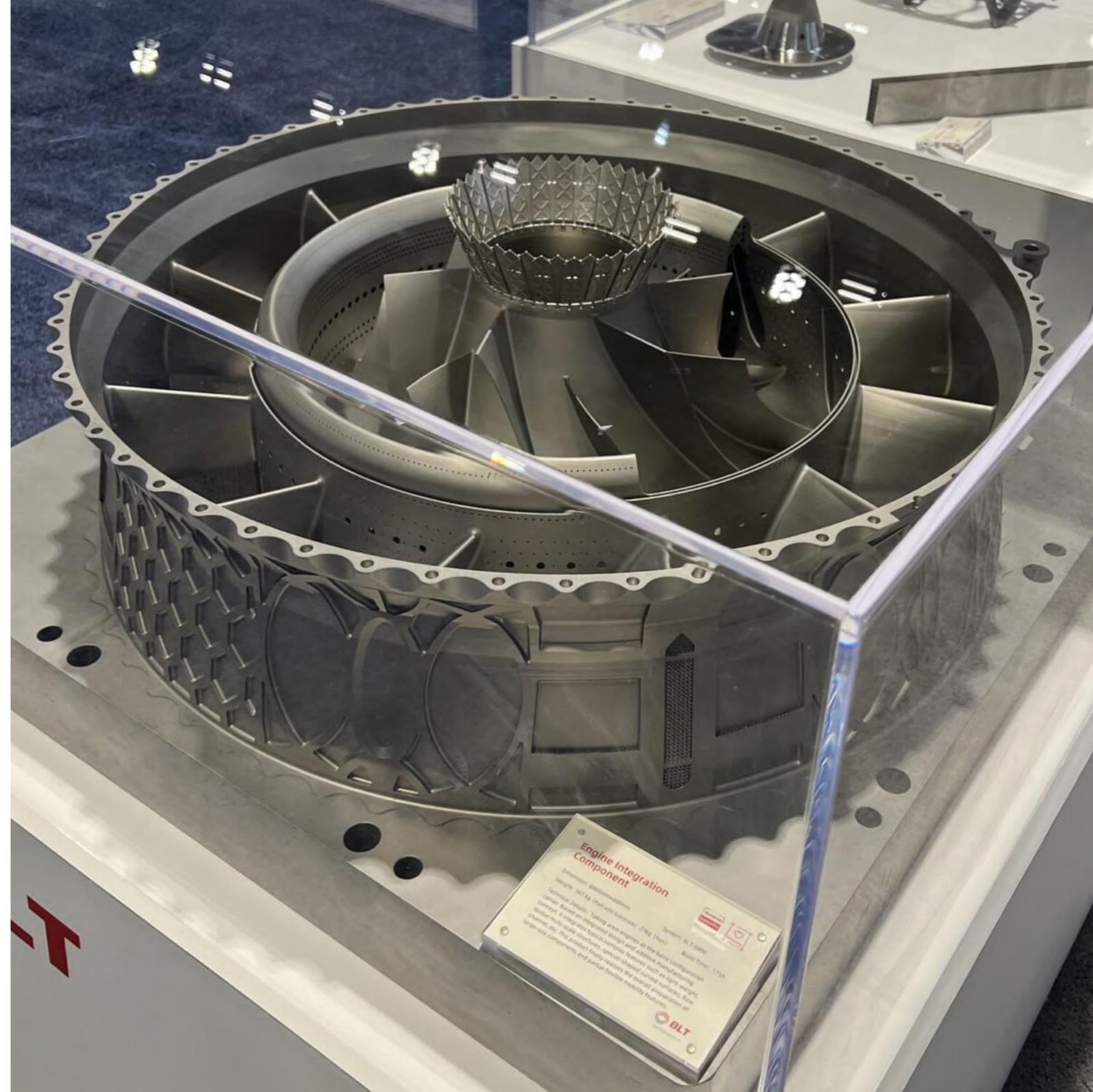
La stampa 3D, con la sua diffusione e le possibilità che offre, ha stimolato riflessioni sul futuro della produzione: è possibile immaginare un mondo in cui gran parte dei beni di consumo venga prodotta direttamente nelle case, riducendo la dipendenza dalle catene di fornitura globali? Sebbene questa visione resti ancora molto lontana, i vantaggi di questa tecnologia sono innegabili. Tuttavia, con le risorse attuali, i costi relativamente elevati e il suo stato di continua evoluzione, non è ancora sostenibile pensare di sostituire integralmente i metodi di produzione tradizionali.

4.9 Le dimensioni

Sebbene la manifattura additiva, con la sua evoluzione, stia diventando sempre più fondamentale in moltissimi ambiti produttivi, uno dei suoi aspetti più controversi è quello legato alle dimensioni che si possono ottenere con le varie tecnologie. Mentre le stampanti AM offrono grande flessibilità a livello progettuale, i volumi di lavoro rimangono generalmente limitati rispetto ai metodi tradizionali, oscillando tra piccole dimensioni millimetriche fino a un massimo di circa un metro cubo per la maggior parte delle tecnologie, con solo alcune eccezioni in alcune applicazioni di produzione additiva di grande formato⁶¹.

61. Un esempio sono le tecnologie Direct Energy Deposition come LENS e la EBAM, che permettono di realizzare componenti che superano il metro cubo di grandezza.

Figura 4.26
Engine Integration Component, pezzo stampato in 175 ore con stampante BLT-S800 (SLM), BLT, 2021 [122].



Limiti dimensionali

La stampa 3D, pur offrendo un innegabile flessibilità nella produzione di oggetti personalizzati, incontra limiti significativi quando si tratta di realizzare pezzi di grandi dimensioni [123].

Deformazioni e tensioni interne

Nella stampa 3D, ogni strato aggiunto durante il processo è soggetto a variazioni di temperatura, specialmente nei materiali come metalli e polimeri. Quando si realizzano oggetti di grandi dimensioni, le fluttuazioni termiche possono causare stress interno e deformazioni, compromettendo la precisione dimensionale e l'integrità strutturale del pezzo finito. Per esempio, nelle tecnologie come SLS e SLM, il riscaldamento localizzato comporta un accumulo di tensioni che si amplificano con l'aumentare delle dimensioni del pezzo.

Tempi di produzione prolungati

La durata della stampa cresce esponenzialmente con le dimensioni dell'oggetto, proprio perchè è necessario un numero maggiore di strati, che necessitano di tempo per essere depositati, raffreddati e stabilizzati. Sebbene l'aumento del volume del pezzo implichi un tempo maggiore per la stampa, non è possibile accelerare il processo senza comprometterne la precisione e la qualità. Inoltre, risulta tecnicamente impraticabile, poiché il materiale necessita di tempo sufficiente per potersi depositare nel modo corretto.

Gestione dei supporti

La gestione dei supporti rappresenta un ulteriore ostacolo quando si stampano oggetti di grandi dimensioni. Durante il processo di costruzione, è spesso necessario realizzare strutture temporanee per sostenere le parti sporgenti o in sospensione. Questi supporti non solo richiedono più tempo per essere stampati, allungando la durata della stampa, ma devono anche essere rimossi con attenzione, aumentando la complessità e il costo del post-processing. Oltretutto, il materiale di cui sono fatti non è riutilizzabile.

Costi elevati di produzione

Le spese associate alla produzione su larga scala rappresentano una sfida considerevole. Le macchine necessarie per lavorare su grandi volumi sono prodotte in quantità molto ridotte e spesso molto costose, richiedono infatti significativi investimenti iniziali. A ciò si aggiungono i costi elevati dei materiali, specialmente quando si utilizzano leghe metalliche o compositi avanzati, e quelli relativi alla manutenzione frequente delle attrezzature a causa delle sollecitazioni meccaniche e termiche prolungate a cui sono sottoposte.

Vincoli dei materiali

La scelta dei materiali è spesso limitata, soprattutto per le applicazioni di grandi dimensioni. Mentre i polimeri e le leghe metalliche più comuni funzionano bene per dimensioni ridotte o medie, all'aumentare del volume si manifestano diversi problemi. Non tutti i materiali utilizzati nell'AM possono resistere alle sollecitazioni meccaniche o termiche che si verificano in oggetti di larga scala. Esistono materiali specifici, ma che fanno aumentare notevolmente i costi, sia per la loro scarsa disponibilità, sia proprio per la loro natura tecnica.

Precisione e vibrazioni

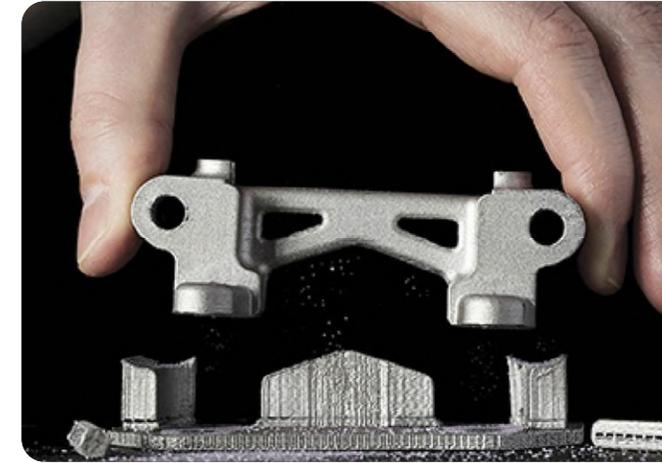
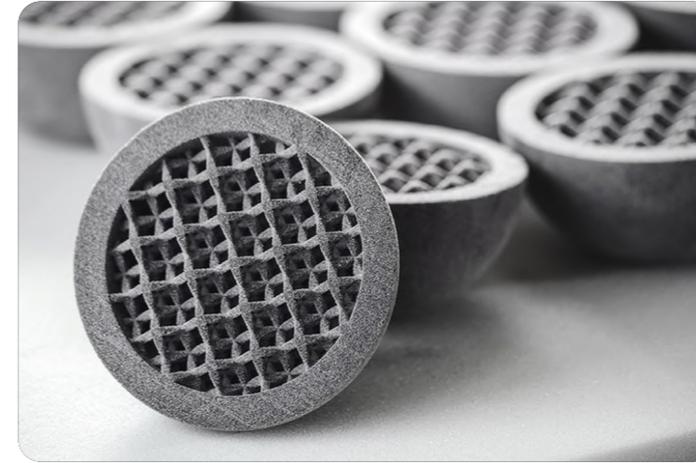
La precisione del processo tende a diminuire progressivamente con l'aumento delle dimensioni degli oggetti. Questo fenomeno è dovuto a due fattori: la dilatazione termica, che causa lievi variazioni dimensionali portando a discrepanze nella geometria finale rispetto al progetto originale; e le vibrazioni delle macchine, che con i loro micro-movimenti possono compromettere la stabilità del processo, influenzando sulla precisione dimensionale e sull'adesione degli strati, con il rischio di creare difetti strutturali.

4.10 Le applicazioni



L'Additive Manufacturing ha trovato spazio in un'ampia gamma di applicazioni specialistiche, dimostrando la sua versatilità e il suo impatto rivoluzionario in diversi settori [93, 101]. Grazie alla capacità di creare geometrie complesse, l'AM è diventato un pilastro fondamentale nell'industria aerospaziale per la produzione di componenti leggeri ma robusti, ottimizzati per ridurre il peso e migliorare l'efficienza del carburante. Nel settore medicale viene utilizzato per realizzare protesi, impianti personalizzati e strumenti chirurgici altamente specifici, garantendo adattabilità e comfort per i pazienti. Anche l'industria automobilistica ne beneficia, utilizzando questa tecnologia per prototipi funzionali e parti uniche e leggere. In ambito energetico trova applicazione nella creazione di turbine e componenti per l'industria petrolifera e del gas, dove l'affidabilità e la precisione sono fondamentali. Nel design e nella moda, la tecnologia apre nuove frontiere creative, permettendo la produzione di creazioni sempre nuove, sperimentando con forme, materiali e texture mai visti prima, ridefinendo il concetto stesso di design e stile.

Figure 4.27 - 4.36
Applicazioni industriali dell'Additive Manufacturing in diversi ambiti [101].



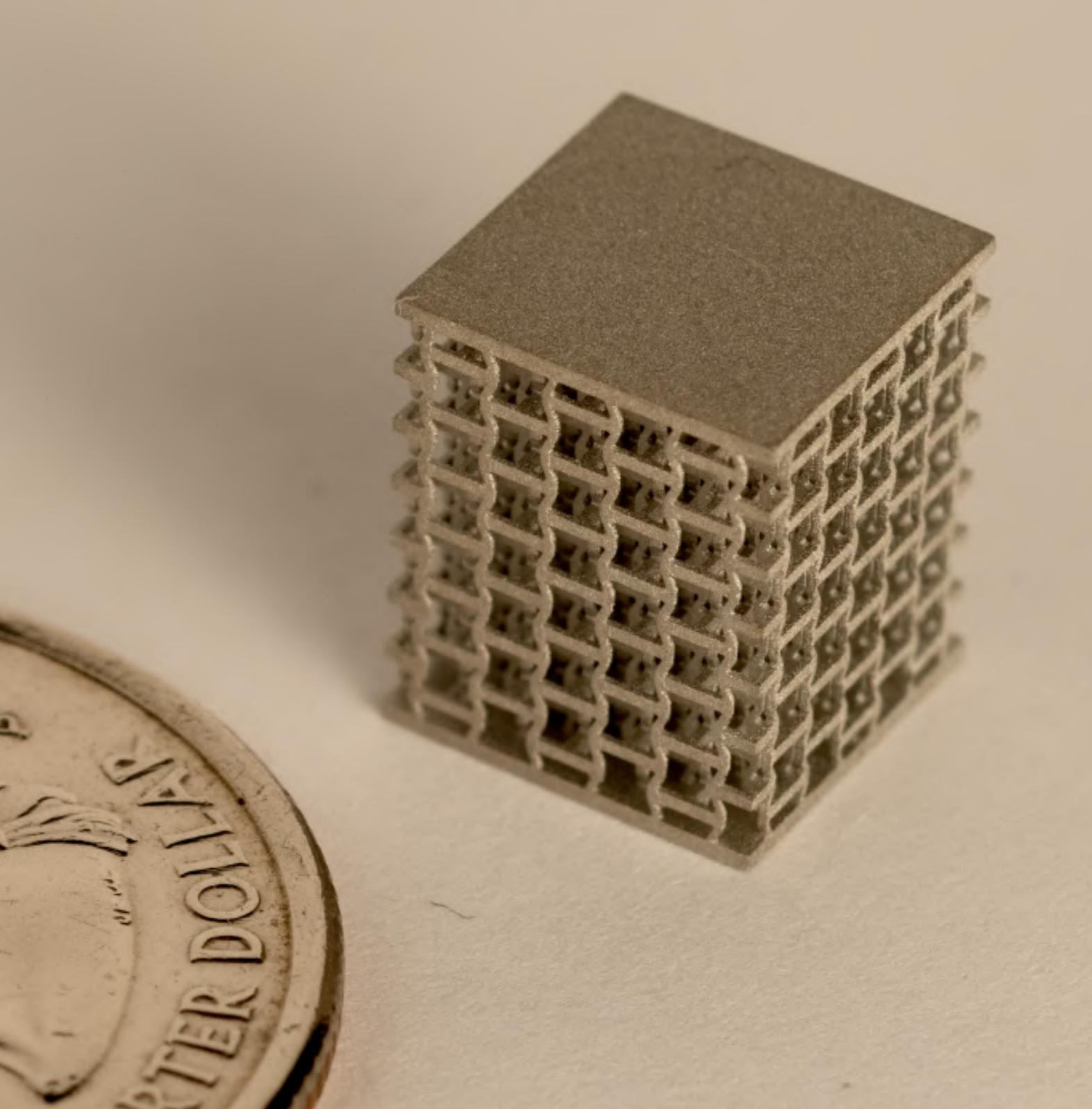


Figura 4.35

Cubo in metallo con struttura reticolare complessa interna, che non potrebbe essere realizzata con tecniche tradizionali di fabbricazione, a confronto con le dimensioni di una moneta [124].

Le tecniche di prototipazione rapida come l'Additive Manufacturing, permettono oggi di sperimentare, di testare e di perfezionare le soluzioni in modo estremamente veloce, consentendo un ciclo di miglioramento continuo, quasi in tempo reale. Ma prototipazione rapida non significa solo velocità di esecuzione; significa anche avere a disposizione un linguaggio concreto per tradurre in realtà forme complesse, impossibili da realizzare con metodi tradizionali. Questa capacità di creare rapidamente nuove versioni di un progetto è ciò che consente ai progettisti di abbracciare il potenziale dell'Additive Manufacturing.

Il Generative Design

Nell'era digitale, il design ha subito una profonda trasformazione grazie all'integrazione di processi matematici e algoritmi in diverse fasi del ciclo produttivo. Questo approccio ha portato alla nascita di una nuova frontiera progettuale, nota come design generativo, rivoluzionando il modo in cui concepiamo e realizziamo i prodotti.

5

5.1 Che cos'è

Il generative design è un processo di progettazione che utilizza algoritmi di Intelligenza Artificiale e calcolo per generare un'ampia gamma di soluzioni progettuali in base ai vincoli e agli obiettivi impostati dal designer [8]. Nella progettazione tradizionale, il designer sviluppa l'intera soluzione partendo da un'idea iniziale, definendo ogni dettaglio e testando le varianti in base alla propria esperienza e creatività. Al contrario, il generative design si basa sull'interazione tra il progettista e il computer. Il designer fornisce al sistema parametri di base (ad esempio, requisiti strutturali, materiali disponibili, limiti di peso o costo) e il software genera automaticamente una vasta selezione di alternative progettuali, dette output [125]. Ognuna di esse è spesso

ottimizzata per aspetti specifici: resistenza, leggerezza, sostenibilità o altri, e può includere configurazioni o forme che il progettista potrebbe non riuscire a considerare intuitivamente. Il processo è simile a quello della selezione naturale: le soluzioni migliori vengono tenute in base ai criteri stabiliti, mentre le varianti che non soddisfano i vincoli vengono scartate. In alcuni casi il software può utilizzare tecniche di machine learning⁶² per affinare ulteriormente la ricerca, migliorando le soluzioni attraverso l'apprendimento da simulazioni precedenti. Ciò permette al sistema di "evolvere" nel tempo e perfezionare ulteriormente il risultato generato, adattandosi a nuovi parametri o a modifiche nelle condizioni di progettazione [127].

62. Dall'inglese "apprendimento automatico". È un ramo dell'Intelligenza Artificiale dedicato allo sviluppo di algoritmi e metodologie che permettono ai sistemi di apprendere automaticamente per migliorare le proprie prestazioni nel tempo [126].

Figura 5.1
Esempio di struttura reticolare progettata con il generative design [128].



La natura come modello

Il generative design si distingue come una delle metodologie progettuali più innovative dell'era digitale, ma il suo concetto di base è tutt'altro che artificiale. Al contrario, il generative design si ispira profondamente alla natura, traendo spunto da meccanismi evolutivi, strutture biologiche e processi di ottimizzazione che la natura ha affinato nel corso di milioni di anni [127]. Questa connessione non è solo concettuale, ma si manifesta concretamente nelle forme, nelle strategie messe in atto e nei risultati che il generative design è in grado di offrire. La natura rappresenta il miglior esempio di sistema capace di ottimizzare le risorse per ottenere il massimo rendimento. Ogni forma vivente, dalle cellule più semplici agli ecosistemi più complessi, è il risultato di un perfetto equilibrio tra efficienza e funzionalità. Le ossa degli animali, ad esempio, sono progettate per essere leggere ma incredibilmente resistenti, grazie a strutture interne che ottimizzano il rapporto tra peso e resistenza.

Le piante, invece, sviluppano foglie con forme e dimensioni "studiate" per massimizzare la raccolta di luce solare, minimizzando al contempo lo spreco di energia. Allo stesso modo, le conchiglie e i gusci degli organismi marini adottano curve e spirali che garantiscono protezione senza aggiungere peso inutile (Figura 5.2). Questi principi di ottimizzazione sono una fonte di ispirazione diretta per il generative design, che cerca di riprodurre la stessa efficienza attraverso l'utilizzo di algoritmi avanzati, applicati a una vasta gamma di contesti progettuali. Uno degli aspetti più evidenti dell'influenza della natura sulla progettazione generativa è di certo la tendenza a produrre forme organiche, fluide e complesse. La forma di queste strutture unisce un'estetica unica a un'elevata funzionalità, risultando tanto efficiente quanto suggestiva. Un esempio emblematico è rappresentato dalle strutture reticolari utilizzate per ridurre il peso preservando al contempo la resistenza.



Figura 5.2
Conchiglia a spirale,
esempio di struttura
naturale ottimizzata per
garantire resistenza e
leggerezza. [129].



Figura 5.3

Superabundance Mask, progetto che esplora la fusione tra corpo umano e forme digitali attraverso una maschera, che rappresenta un tessuto fibroso intento a sovrascrivere i tratti del volto umano, stampata in 3D e progettata in maniera generativa, Filippo Nassetti, 2018 [130].

Grazie alla sua capacità di replicare i processi naturali, il design generativo migliora le prestazioni e l'efficienza dei prodotti offrendo un nuovo modo di vedere la progettazione, in cui la tecnologia non è separata dalla natura ma lavora in armonia con essa. Proprio come la natura, il design generativo non si limita a creare: evolve, risponde e si adatta. Per questo motivo, rappresenta una delle espressioni più avanzate del tentativo dell'uomo di imparare dalla natura e di applicare i suoi insegnamenti per risolvere le sfide del nostro tempo.

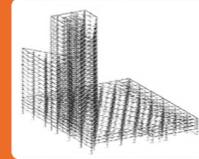
5.2 La storia

Anche se il concetto di generative design ha radici antiche, come l'esplorazione delle regole e delle strutture naturali delle piante e dei microrganismi, a livello storico questa tecnologia è sorprendentemente recente.

Solo negli ultimi decenni, grazie ai progressi nella computazione e negli algoritmi, è stato possibile tradurre queste intuizioni in strumenti concreti e applicazioni pratiche.



Nasce Sketchpad, il primo sistema CAD, sviluppato da Ivan Sutherland. Questo strumento permette per la prima volta di lavorare direttamente con un'interfaccia computazionale per creare e modificare modelli [131, 132].



Si sviluppano algoritmi che non si limitano a modificare, ma a generare forme in base a vincoli e obiettivi specifici. Diversi progettisti iniziano a esplorare queste tecniche per creare strutture architettoniche nuove [132].

L'architetto Patrik Schumacher formalizza il movimento del parametricismo con il suo "Parametricist Manifesto". In esso Schumacher presenta questa metodologia non solo come uno strumento, ma come un nuovo stile globale [131].



Esce la rivista "Parametricism 2.0: Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century" che esplora sia le potenzialità sia le criticità dell'approccio parametrico [131, 136].

1963

1990

2008

2016

1987

Software come CATIA e PTC Creo (Pro/ENGINEER) portano il concetto di parametrizzazione nel design industriale. Gli utenti possono modificare forme e configurazioni regolando parametri specifici, dando vita a geometrie più complesse [133].



2007

Nasce Grasshopper, plug-in per il software Rhinoceros, che democratizza l'uso del design parametrico, rendendolo accessibile a un pubblico più vasto. Il software permette infatti ai designer di costruire geometrie complesse e interattive senza bisogno di scrivere codice. Oggi è uno dei principali programmi per la progettazione parametrica [134].



2013

Nasce Fusion 360, software CAD sviluppato da Autodesk che permette la progettazione di modelli 3D in modo generativo in modo facile e intuitivo. Ad oggi è uno dei programmi maggiormente utilizzati per il design generativo [135].



Oggi

Il generative design è oggetto di numerose sperimentazioni ed è utilizzato non solo per creare forme innovative, ma anche per migliorare l'efficienza energetica e ridurre gli sprechi, rafforzando il legame con i principi naturali di ottimizzazione.

5.3 Generative Design e Additive Manufacturing

Quando si progetta componenti da realizzare con la produzione additiva è fondamentale adottare l'approccio del Design for Additive Manufacturing, ottimizzando i prodotti sulla base di questa tecnologia, sfruttandone al massimo i vantaggi e le caratteristiche di processo. Tra i metodi di DfAM più innovativi si colloca il design generativo, che prende il nome di Generative Design for Additive Manufacturing (G-DfAM)⁶³. Questo metodo consente sia di esplorare possibilità che altrimenti non sarebbero realizzabili solamente con l'intuizione umana, sia di sfruttare al meglio la libertà geometrica offerta dalla stampa 3D [137].

La produzione additiva, con la sua capacità di fabbricare forme irrealizzabili con le tecniche tradizionali, risulta essere quindi il complemento ideale del design generativo. Ad esempio, le strutture reticolari e i componenti a forma libera,

comunemente generati dagli algoritmi del design generativo, possono essere prodotti rapidamente e con elevata precisione grazie all'additive manufacturing. La combinazione tra queste tecnologie apre nuove opportunità in termini di efficienza economica e personalizzazione. La stampa 3D permette di produrre forme complesse senza costi esponenziali, rendendo sostenibile la sperimentazione di soluzioni multiple. Inoltre, favorisce la personalizzazione di massa, rendendo possibile realizzare varianti uniche dello stesso prodotto per soddisfare le esigenze di ogni utente [8]. Questa sinergia, inoltre, consente di simulare in anticipo la produzione, prevenendo e correggendo deformazioni o sollecitazioni indesiderate nei componenti dei pezzi, migliorando l'efficienza del processo produttivo, e di conseguenza risparmiando sui costi [125].

63. Approccio progettuale che combina design generativo e DfAM (Design for Additive Manufacturing) per creare geometrie ottimizzate per la stampa 3D [137].

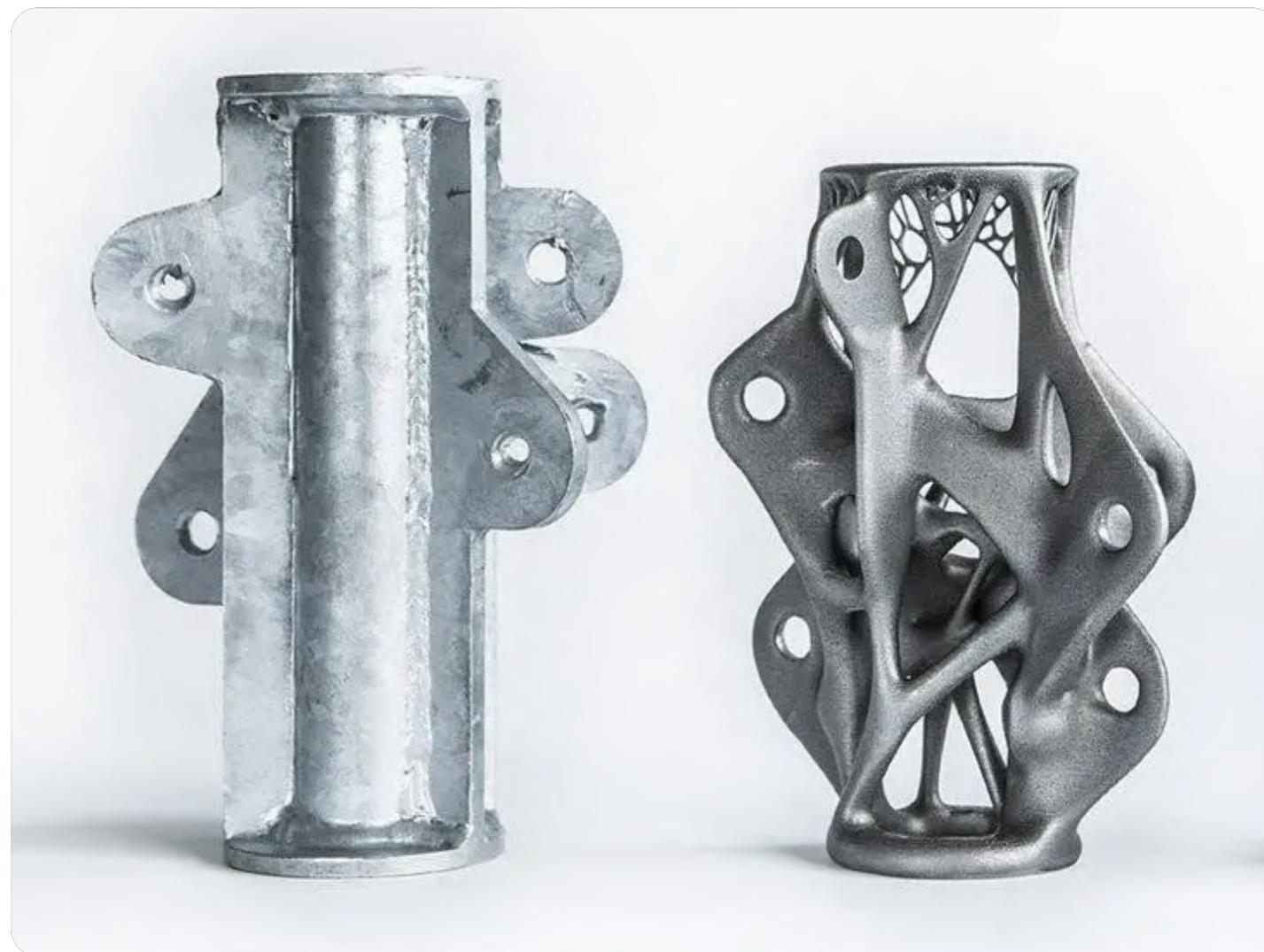


Figura 5.4
Componente con geometrie tradizionali prodotto tramite manifattura tradizionale (a sinistra) e componente progettato in maniera generativa prodotto con additive manufacturing (a destra) [8].

Il rapporto tra design generativo e produzione additiva rappresenta un connubio vincente, capace di ridefinire i confini della progettazione e della produzione odierna. Queste tecnologie, insieme, consentono di creare prodotti personalizzati e ottimizzati per prestazioni sempre maggiori, aprendo nuove strade in un numero crescente di settori.

5.4 Generative Design e Ottimizzazione Topologica

L'ottimizzazione topologica e il design generativo sono due metodologie basate su algoritmi computazionali che spesso vengono confuse.

Il design generativo fa uso di simulazioni e Intelligenza Artificiale per esplorare e generare un'ampia varietà di soluzioni, senza partire da una forma definita. Il progettista stabilisce obiettivi di progetto, parametri e vincoli, e il software genera automaticamente molteplici alternative progettuali tra cui scegliere [125]. Al contrario, l'ottimizzazione topologica rappresenta una tecnica consolidata, presente da oltre vent'anni in molti programmi di modellazione CAD [8]. Questo metodo consente di ottimizzare la distribuzione del materiale all'interno di un progetto per soddisfare requisiti prestazionali specifici [125], riducendolo alla geometria minima per poter assor-

bire le forze massime che subirà durante l'utilizzo. Il processo parte però da un modello CAD iniziale, creato da un progettista, e richiede l'applicazione di vincoli e parametri progettuali su di esso. Il software genera quindi un solo ed unico risultato, una singola mesh⁶⁴ ottimizzata nel materiale, che il progettista può valutare e rifinire. Sebbene molto efficace, l'ottimizzazione topologica è limitata dalla necessità di avere un modello di partenza, oltre che ad una sola forma finale come risultato, restringendo così il campo delle sue possibili applicazioni. Essa può quindi essere considerata un punto di partenza per la progettazione generativa, la quale, però, compie un ulteriore passo in avanti, eliminando la necessità di un modello iniziale e assumendo direttamente il ruolo di progettista partendo solo da alcuni input [8].

64. Tipologia di struttura costituita da una rete di poligoni utilizzata per rappresentare la superficie di un oggetto nei software CAD. Ad esempio, il file STL è una mesh composta da triangoli.

Figura 5.5
Componente metallico realizzato con la geometria di partenza (sinistra) e con la geometria ottimizzata topologicamente (destra) [138].



5.5 Generative Design e Design Parametrico

Il design generativo e il design parametrico sono metodi di progettazione che fanno parte del più ampio campo della progettazione computazionale. Entrambi utilizzano parametri e vincoli per arrivare a un risultato, ma differiscono molto per il modo in cui affrontano il processo creativo e decisionale.

Introdotta nel 2008 dal teorico dell'architettura Patrick Schumacher, il design parametrico è un approccio progettuale interattivo e iterativo⁶⁵, che si basa sull'utilizzo di parametri definiti dal progettista per modificare e controllare un progetto [131]. Questo approccio permette al designer di interagire direttamente con il modello: ogni volta che un parametro viene cambiato o modificato, il modello virtuale si aggiorna in tempo reale [139]. La progettazione parametrica risulta quindi molto utile per esplorare rapidamente alternative e ottimizzare le relazioni spaziali tra gli elementi di un progetto. Uno dei programmi più conosciuti per proget-

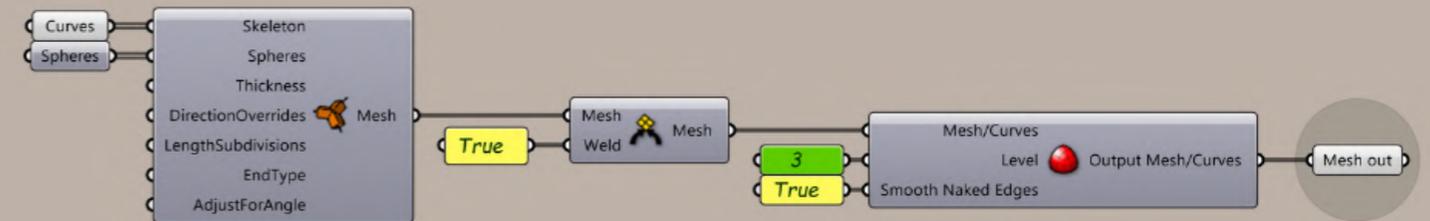
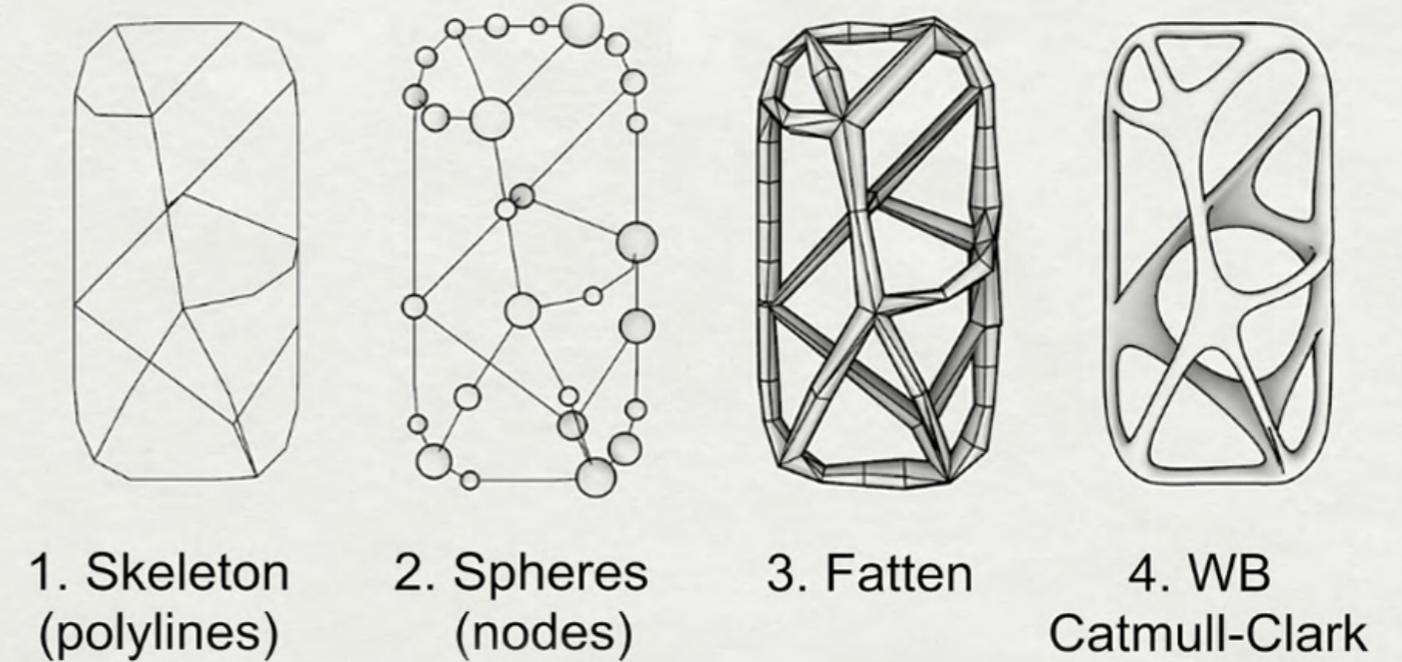
tare in questo modo è Grasshopper, un plug-in per Rhinoceros⁶⁶ che utilizza un sistema basato su nodi visivi. Ogni nodo rappresenta un'operazione o un parametro, e collegandoli tra loro è possibile creare complessi flussi di lavoro progettuali. Concentrandosi però sul controllo diretto del progettista, il design parametrico è limitante, poiché strettamente legato alla sua creatività e alla sua visione. Infatti il progettista definisce la forma basandosi sul proprio pensiero, utilizzando e modificando i parametri come strumenti per modellarla. Nel generative design, invece, è il software a determinare la forma, generandola in base ai vincoli e alle caratteristiche stabilite precedentemente dal designer. Questa tecnologia, usando algoritmi per esplorare automaticamente un ampio ventaglio di possibilità, riduce il carico decisionale umano, e agisce come un "co-designer"⁶⁷, espandendo quelli che sono i limiti della creatività umana.

⁶⁵. Processo che si ripete più volte seguendo cercando un miglioramento progressivo.

⁶⁶. Software di modellazione 3D ampiamente utilizzato nel design industriale.

⁶⁷. Un aiutante attivo che contribuisce al lavoro e alle idee.

Figura 5.6
Schema esemplificativo della progettazione parametrica attraverso il sistema di funzionamento tramite nodi di Grasshopper [140].



5.6 Strumenti per il Generative Design

Per poter progettare in maniera generativa è necessario l'utilizzo di programmi CAD appositi. Oggi molti software moderni hanno integrato funzionalità generative o offrono plug-in dedicati per ampliare le possibilità progettuali. Rispetto ai CAD convenzionali, i programmi di progettazione generativa consentono al designer di avere un livello di controllo più avanzato sul progetto, permettendo di definire parametri e vincoli, assegnare priorità ad alcune caratteristiche e affinare i risultati ottenuti. Questi strumenti sono numerosi e utilizzano approcci diversi per ottenere i risultati desiderati. Per raggiungere l'obiettivo progettuale dei giunti per forma, in questa tesi è stato scelto il software Fusion 360 di Autodesk⁶⁸, ritenuto il più idoneo in termini di requisiti, prestazioni ed accessibilità, grazie alla licenza studente fornita dal Politecnico di Torino. Per questo motivo, nel seguente lavoro l'attenzione sarà focalizzata su questo software specifico.

⁶⁸. Azienda leader nello sviluppo di software per la progettazione e la produzione, nota per programmi come AutoCAD e Fusion 360.

Tabella 5.1
Tabella riassuntiva dei programmi software CAD più comuni per la progettazione generativa [8, 141-145]. Fusion 360, evidenziato in tabella, è il programma utilizzato per questo progetto.

	Descrizione	Logo
Fusion 360	Software di progettazione e ingegnerizzazione di prodotti con funzionalità di progettazione generativa. Può generare diverse varianti di un singolo componente partendo dalle sollecitazioni a cui sarà sottoposto, così che ogni forma esplorata possa essere efficace e pronta per la produzione.	
Creo Generative Design	Strumento che si avvale di algoritmi avanzati per automatizzare il processo di progettazione, esplorando molte varianti contemporaneamente, abbreviando i tempi. L'utente definisce i parametri di design e l'algoritmo sottolinea le iterazioni che corrispondono meglio a tali obiettivi.	
nTop Platform	Programma avanzato per la progettazione che combina modellazione 3D, simulazione e ottimizzazione in un'unica piattaforma. Servendosi di strumenti generativi avanzati, gli utenti possono creare flussi di lavoro su misura per i requisiti specifici di una determinata applicazione.	
NX CAD	Soluzione per la progettazione CAD che combina modellazione, progettazione parametrica e progettazione generativa. Possiede una tecnologia chiamata "digital twin", che consente di creare una rappresentazione digitale completa del prodotto.	
MSC Apex Generative Design	Software per la simulazione e l'analisi strutturale progettato per semplificare il processo di modellazione e validazione. Combina un'interfaccia utente intuitiva con strumenti avanzati di simulazione e ottimizzazione.	

5.7 Le fasi della progettazione generativa

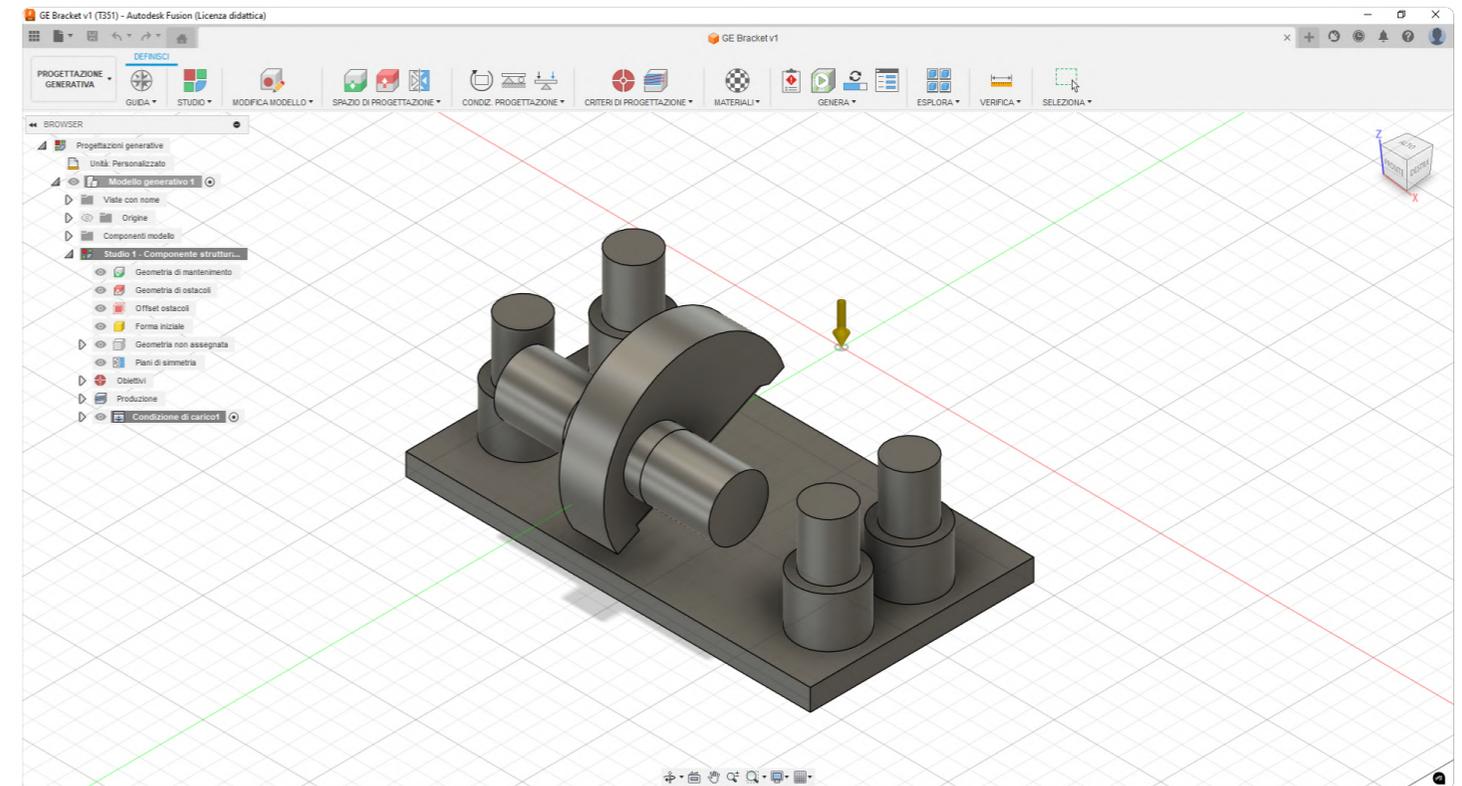
Fusion 360 mette a disposizione diverse funzioni di modellazione, dall'utilizzo delle superfici alle mesh, fino al rendering e all'ottimizzazione topologica. Centrale in questo studio è la funzione incorporata di progettazione generativa, che consente di inserire vincoli, materiali, requisiti strutturali e le tecnologie di produzione per generare forme finali. Affinché la progettazione di forme attraverso il generative design risulti efficace, è fondamentale seguire una serie di passaggi rigorosi. Solo rispettando accuratamente ogni fase del processo, è possibile ottenere risultati concreti, poiché qualsiasi errore o imprecisione impedisce al software di elaborare correttamente le forme. Nell'ambito di questa tesi, è stato scelto di utilizzare Autodesk Fusion 360 come strumento principale. Pertanto, il metodo di generazione delle forme qui descritto si basa sulle specifiche modalità operative e sui requisiti tecnici di questo software.

Introduzione

Qualsiasi processo di generative design parte definendo delle forme semplici che rappresentano lo "scheletro", il minimo richiesto dal software affinché possa comprendere come procedere⁶⁹. Successivamente tutto il processo si incentra sul definire regole, requisiti e linee guida che il programma dovrà seguire per poter infine generare tutte le possibili soluzioni progettuali che è in grado di offrire. Sarà poi compito del progettista filtrare i risultati proposti per selezionare il progetto più convincente, che verrà rielaborato e perfezionato, oppure usato unicamente come concept di studio da cui prendere ispirazione.

69. Al fine di illustrare in modo semplice ed esaustivo le fasi del processo di progettazione generativa in Fusion 360 si è scelto di documentarlo su un componente di esempio fornito dalla libreria di Autodesk.

Figura 5.7
Schermata del programma dopo aver selezionato ed importato il modello di partenza.

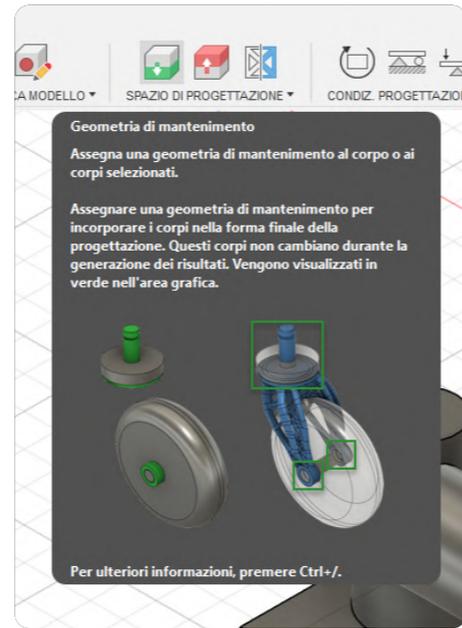


Selezione geometrie di mantenimento

Come primo step occorre selezionare tutti i componenti e le geometrie che devono essere incorporati nel modello finale perché, senza di questi, il risultato sarebbe inutilizzabile per l'impiego desiderato. Nel pezzo in analisi occorre quindi selezionare i 6 anelli che fungono da sede per i perni.

Figura 5.8 →
Infografica del programma che spiega il funzionamento della fase di selezione delle geometrie di mantenimento.

Figura 5.9 ↓
Fase di selezione delle geometrie di mantenimento.

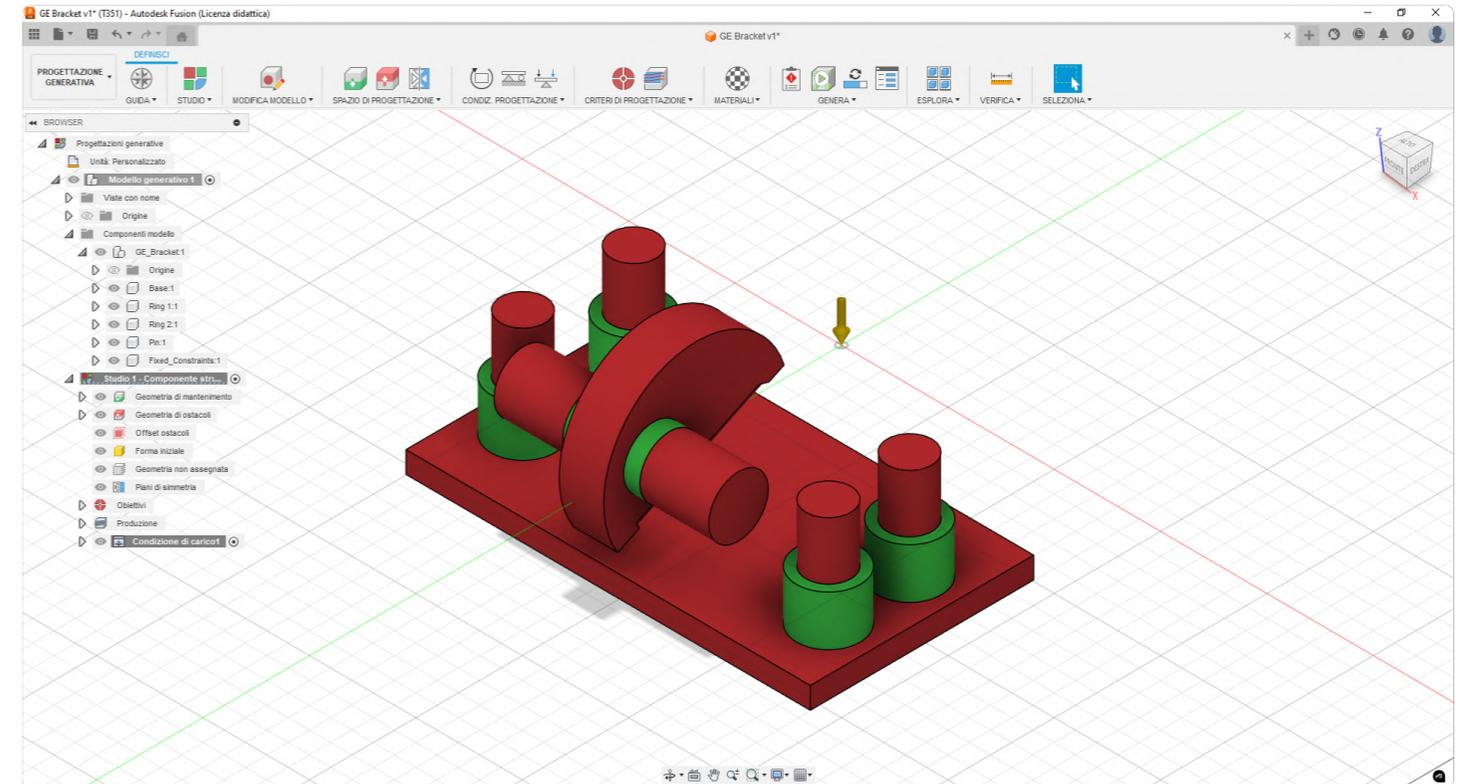
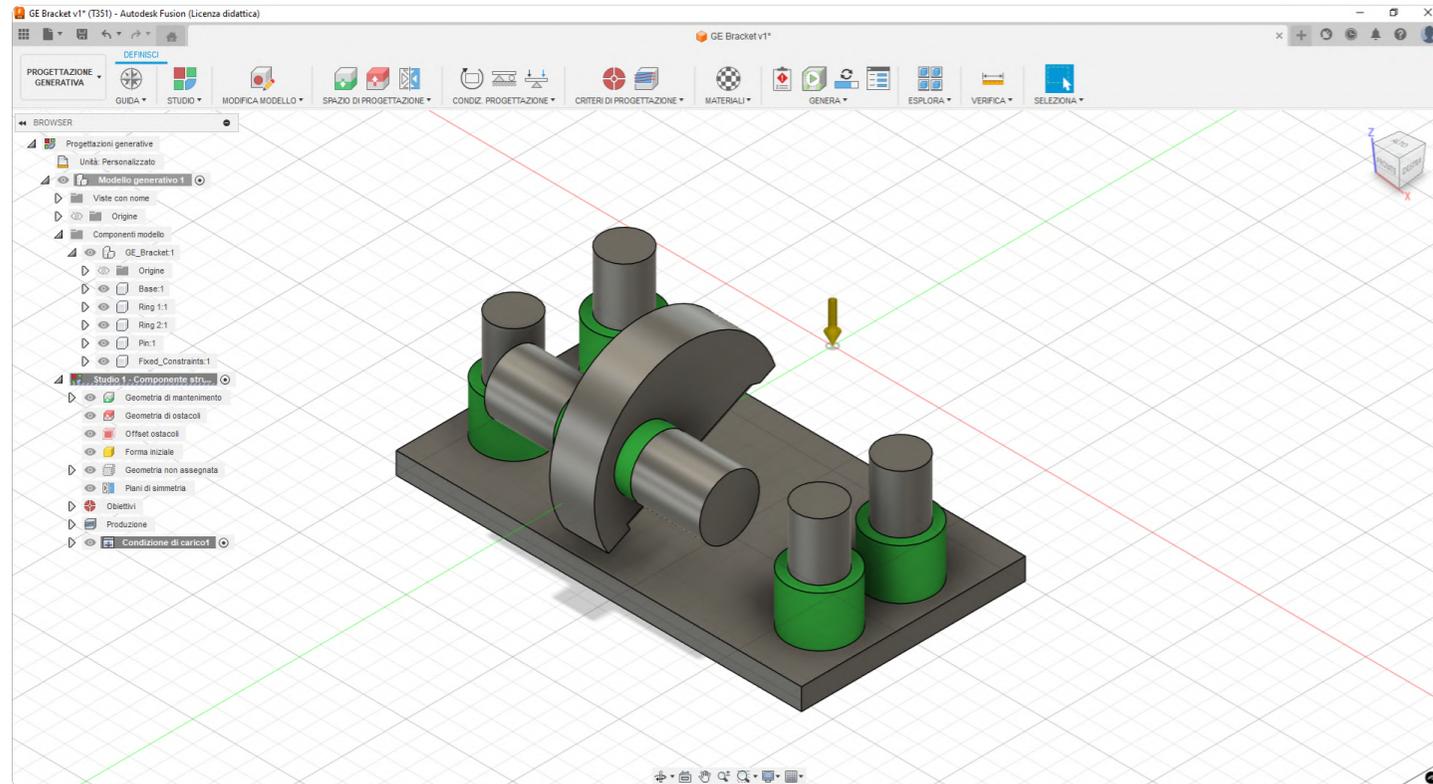
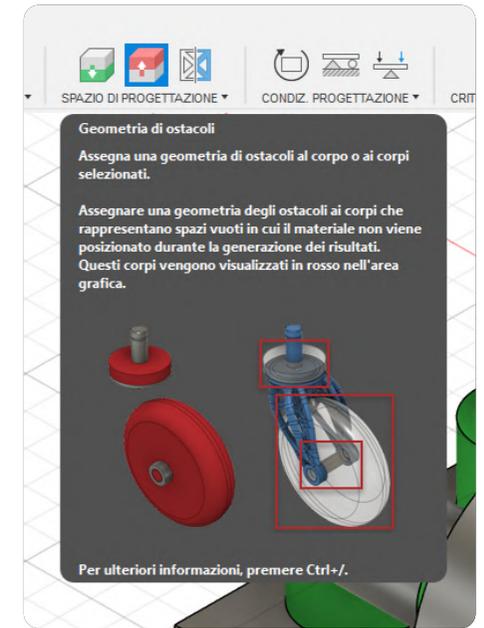


Selezione geometrie di ostacolo

Questo step è opzionale, ma di vitale importanza qualora si desideri definire tutte le aree e i volumi che il progetto generativo non può occupare. Nel caso preso in analisi, per esempio, è necessario selezionare le parti mostrate nella Figura 5.11 poiché, se il componente generato occupasse questi spazi, non si riuscirebbe a utilizzare. Come ostacoli, infatti, si selezionano i perni, cosicché gli anelli, precedentemente impostati come geometrie da mantenere, restino forati. Qualora non si indicasse al software dove occorre mantenere i fori, questo andrebbe a distribuire il materiale anche dove non dovrebbe esserci, finendo per riempirli.

Figura 5.10 →
Infografica del programma che spiega il funzionamento della fase di selezione delle geometrie di ostacolo.

Figura 5.11 ↓
Fase di selezione delle geometrie di ostacolo.



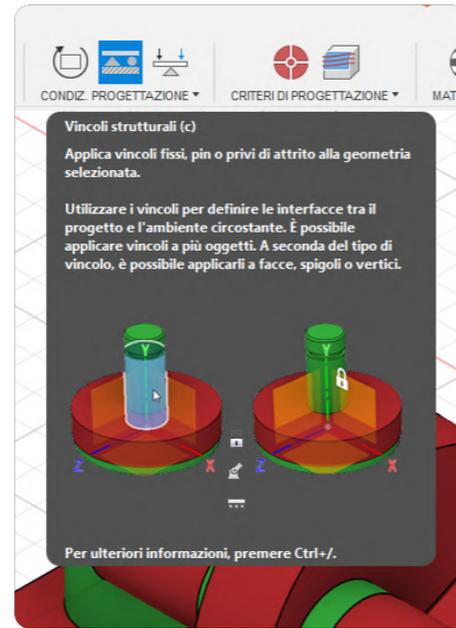
Selezione dei vincoli strutturali

Successivamente si procede con l'assegnazione dei vincoli strutturali, utili a definire in che modo la progettazione interagisce con gli oggetti non inclusi nel modello. Definire correttamente i vincoli è fondamentale per far comprendere al software quali parti dell'oggetto preso in analisi sono vincolate, cioè non possono muoversi⁷⁰. Nella forma presa in considerazione si decide di attribuire i vincoli ai 4 anelli situati sulla base del componente e ai 2 presenti sulla parte superiore. Funzionando da sedi ospitanti dei perni, infatti, questi non devono essere liberi di muoversi nello spazio.

70. Su Fusion 360 le parti che presentano dei vincoli sono rappresentate con il simbolo di un lucchetto (Figura 5.12 e 5.13).

Figura 5.12 → Infografica del programma che spiega il funzionamento della fase di selezione dei vincoli strutturali.

Figura 5.13 ↓ Fase di selezione dei vincoli strutturali.



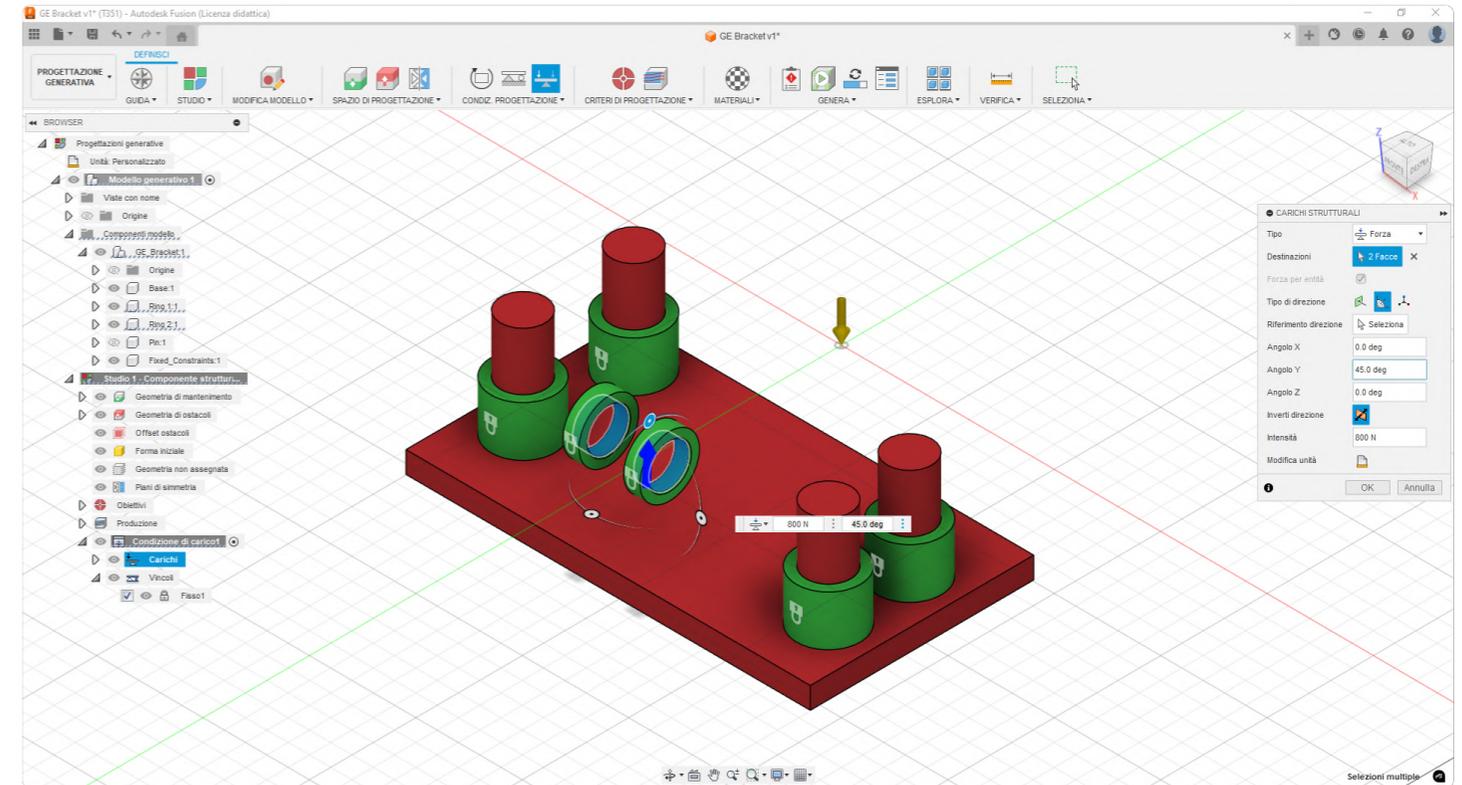
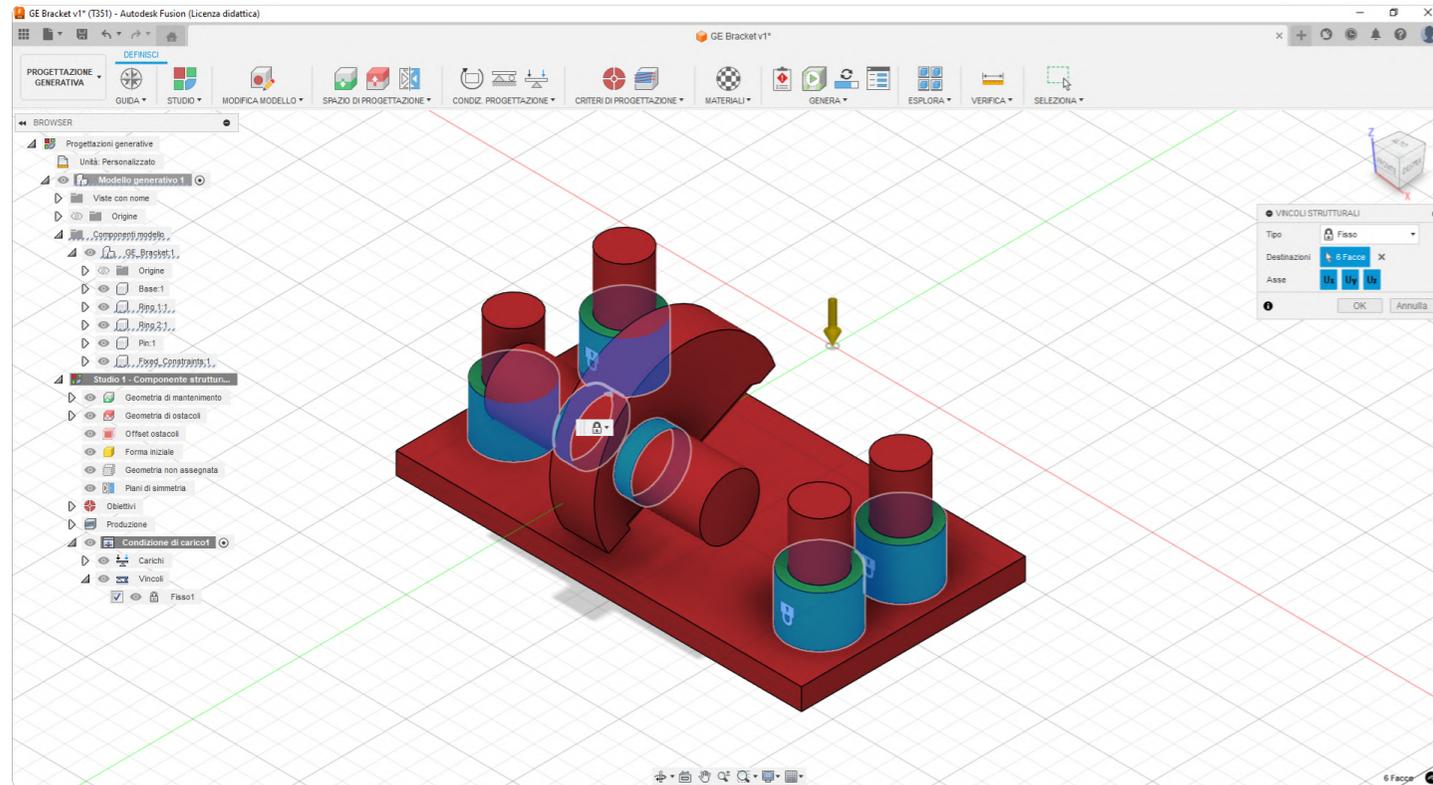
Definizione dei carichi

Questa fase consiste nel definire⁷¹ la direzione, il verso, il punto di applicazione, l'entità e la tipologia dei carichi (sollecitazioni come forze e momenti) ai quali l'oggetto deve resistere. Nel caso del componente preso in analisi, ad esempio, vengono applicate delle forze di 800 N lungo l'asse Z, che agiscono sui due anelli centrali.

71. L'unica che non va definita è la forza di gravità, visibile in giallo al centro della scena, poiché il software ne tiene già conto.

Figura 5.14 → Infografica del programma che spiega il funzionamento della fase di inserimento dei carichi.

Figura 5.15 ↓ Fase di inserimento dei carichi.



Criteri di progettazione: obiettivi

Si passa in seguito alla definizione degli obiettivi della progettazione e della tecnologia di produzione.

Come obiettivi della progettazione è possibile selezionare tra due opzioni: minimizzare la massa, dando priorità al risparmio materico e alla leggerezza del componente, o massimizzare la rigidità, migliorando le prestazioni meccaniche e la resistenza. Dallo stesso pannello è possibile impostare anche il coefficiente di sicurezza⁷². Inoltre, c'è la possibilità di includere parametri aggiuntivi come la frequenza modale, lo spostamento e il carico di punta; in questo caso, però, non sono fattori rilevanti per l'oggetto.

⁷² Il fattore di sicurezza è un valore che rappresenta di quanto un progetto è più resistente rispetto al carico massimo previsto. Si calcola dividendo la capacità massima del componente per il carico effettivo che dovrà sopportare. È finalizzata a garantire che, anche con carichi maggiori del previsto, l'oggetto resista.

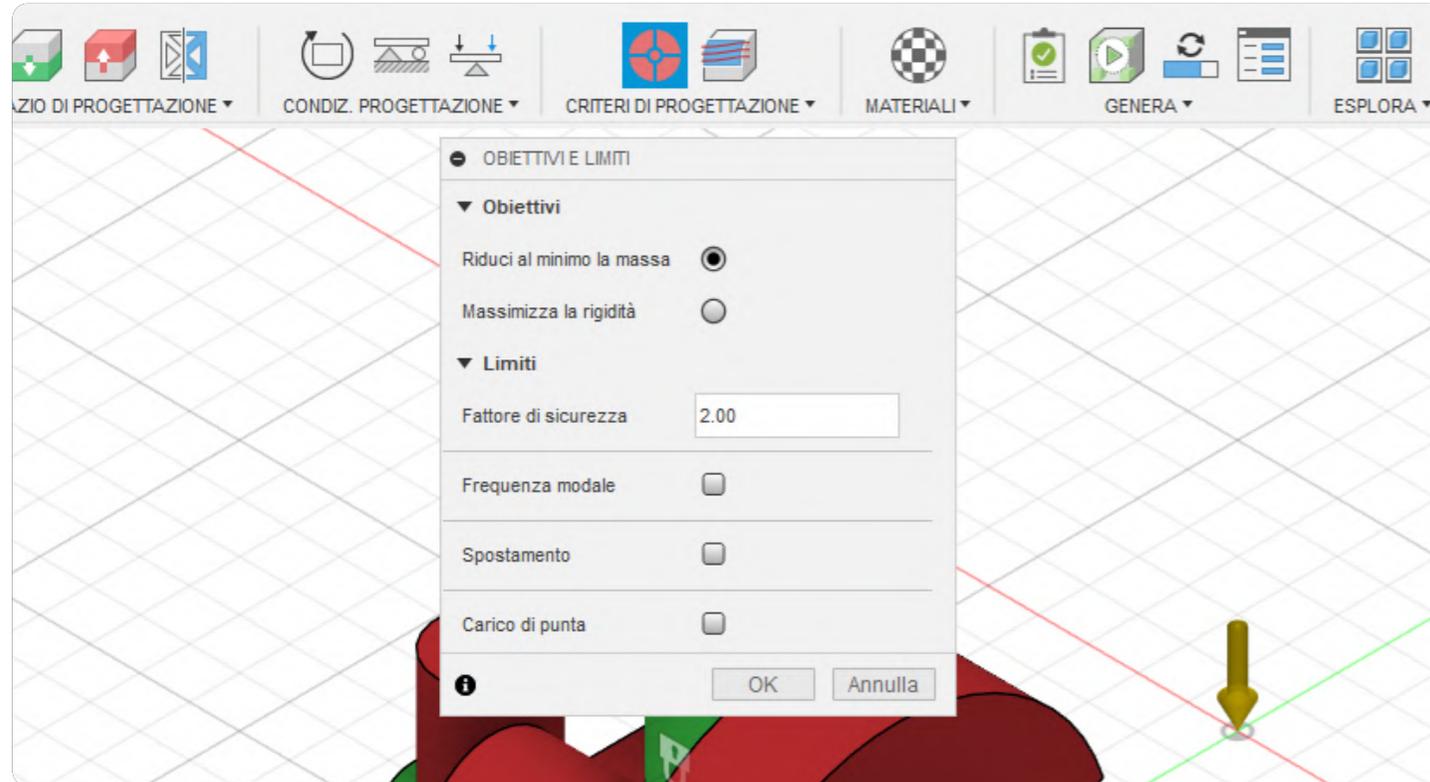


Figura 5.16
Fase di settaggio degli obiettivi di progettazione.

Criteri di progettazione: tecnologia di produzione

Il secondo criterio, la selezione della tecnologia di produzione, è fondamentale, in quanto il software genererà un componente che sia adatto alla produzione con la tecnologia selezionata. Per un confronto interessante si è deciso di selezionare sia la tecnologia additiva che una tecnologia tradizionale ad asportazione di truciolo, quale la fresatura.

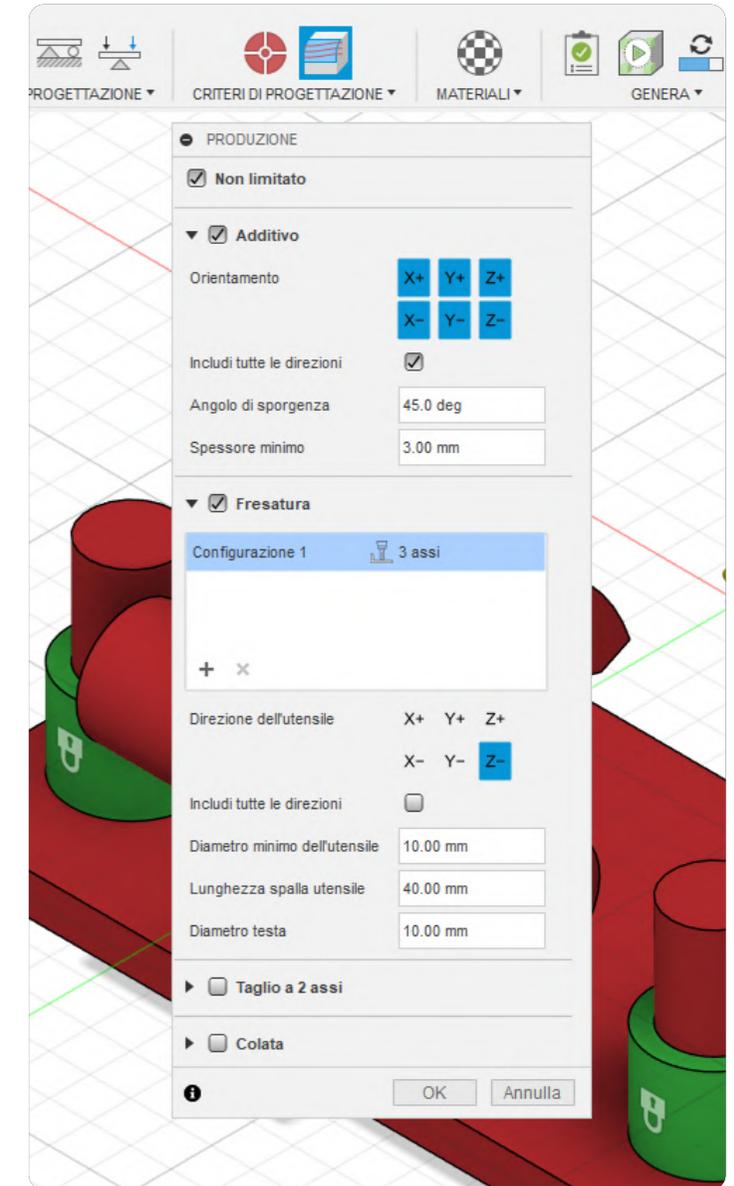


Figura 5.17
Fase di selezione della tecnologia di produzione del componente.

Materiali

Prima di procedere con la generazione, occorre selezionare i materiali con i quali si vuole effettuare lo studio.

Fusion 360 mette a disposizione una libreria di materiali che varia a seconda della tecnologia di produzione impostata. In questo caso, sono stati selezionati un acciaio generico e il PEEK⁷³.

73. Acronimo di "Polyether Ether Ketone". Polimero termoplastico ad alte prestazioni (resistenza meccanica, chimica e termica). È ampiamente utilizzato nel settore aerospaziale, medicale e automotive.



Figura 5.18
Fase di selezione dei materiali con cui verrà prodotto l'oggetto.

Check finale

Infine, come ultimo step che precede la generazione vera e propria, occorre verificare che tutto il procedimento effettuato fino ad ora sia avvenuto correttamente. Una volta ricevuta la conferma positiva da parte del software è possibile procedere con la generazione dei risultati.

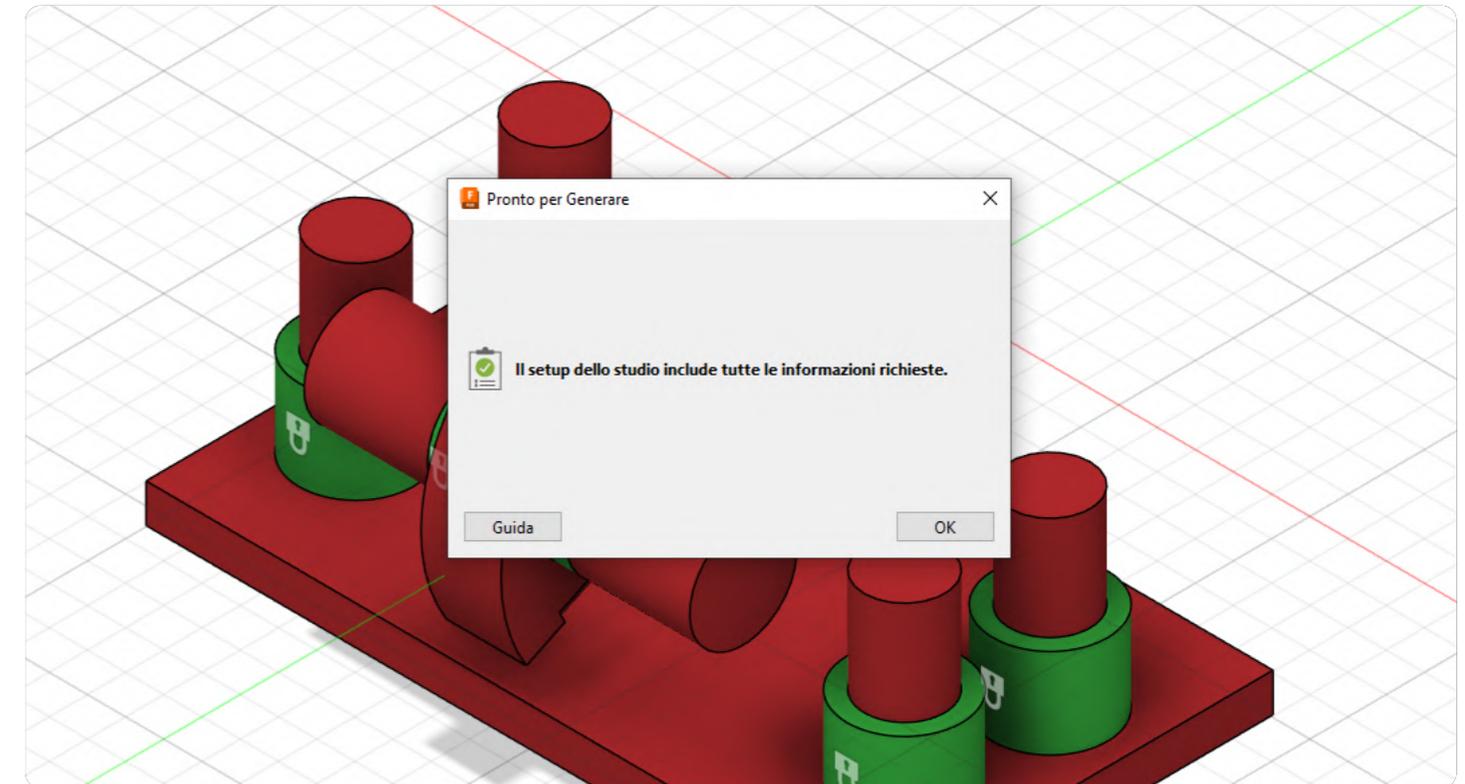


Figura 5.19
Finestra di notifica del software che conferma il corretto svolgimento di tutti i passaggi.

Forme generate

Una volta terminata la fase di generazione, è possibile filtrare i risultati in base alla tecnologia di produzione, al materiale e al peso. Spetta infine al progettista analizzare con occhio critico e selezionare i risultati più convincenti da impiegare e rielaborare.

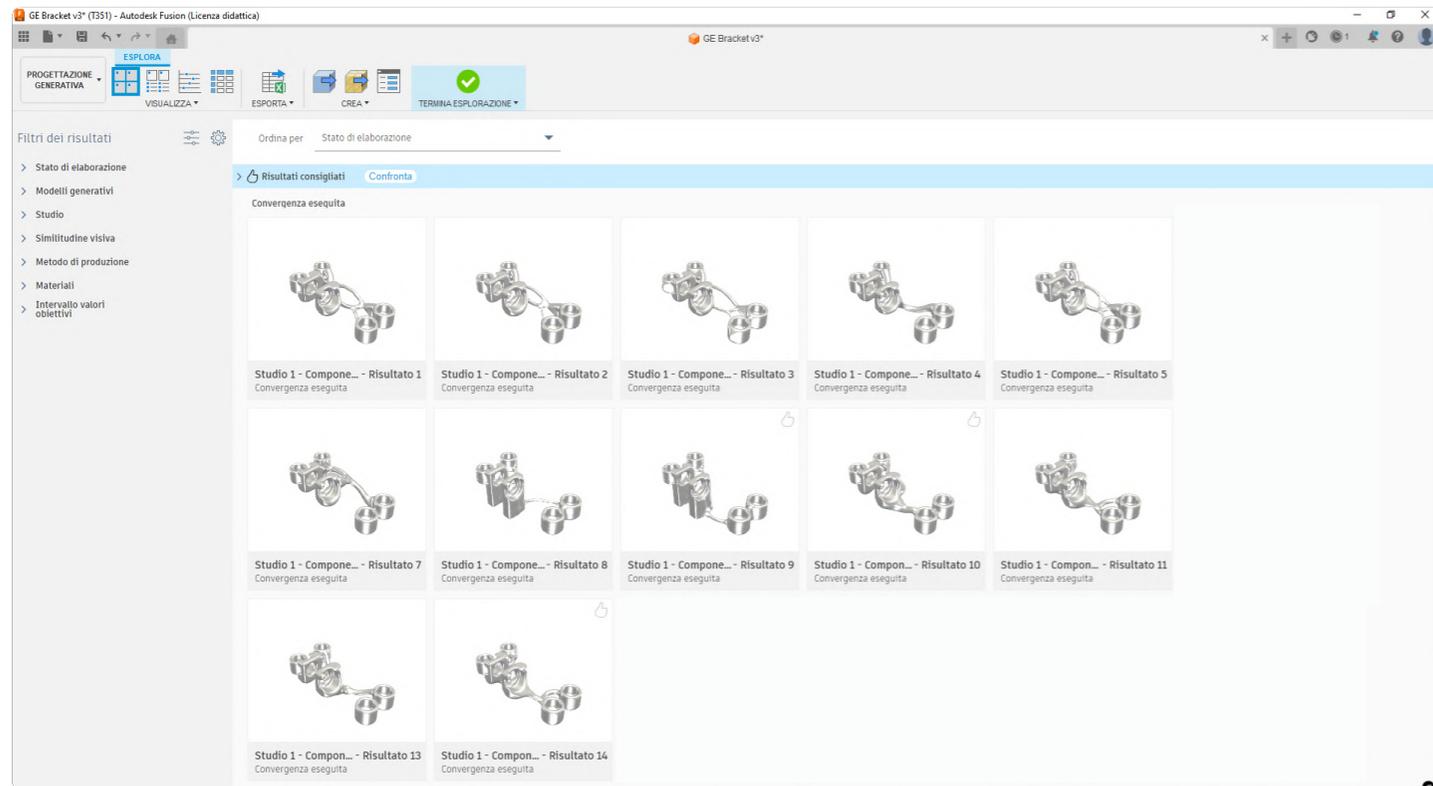


Figura 5.20
Schermata che mostra le anteprime di tutti i modelli che sono stati generati.

Figura 5.21

Fase di confronto tra alcuni dei risultati generati dal programma per poter scegliere il modello più adatto da produrre o rielaborare.



5.8 Vantaggi e svantaggi

Il design generativo si pone come un'innovazione rivoluzionaria nel campo della progettazione, offrendo opportunità uniche per ottimizzare i processi, migliorare le prestazioni e superare i limiti della progettazione tradizionale. La sua implementazione richiede però diverse considerazioni sulle sue limitazioni. La progettazione generativa si basa su software e algoritmi complessi, il che la rende vulnerabile a problemi tecnici ed errori. Inoltre, dipendendo molto da questi programmi, il designer deve accettare la frustrazione portata dal fatto che il software possa proporre soluzioni al di fuori della sua visione originale. Per ottenere i migliori risultati da questa tecnologia è fondamentale bilanciare l'automazione con l'intervento umano e investire nella formazione e nella scelta dei giusti strumenti software. Con un utilizzo oculato, il design generativo può diventare una risorsa fondamentale per affrontare le sfide progettuali del futuro.

Vantaggi di processo e prodotto

- Esplorazione di forme e linguaggi non convenzionali
- Capacità di proporre soluzioni che vanno oltre i limiti del pensiero umano
- Riduzione dei tempi di progettazione e di modellazione delle forme
- Ottimizzazione delle prestazioni e dei materiali
- Possibilità di sfruttare a pieno le potenzialità della fabbricazione additiva
- Riduzione degli sprechi materici grazie a forme ottimizzate
- Possibilità di esplorare un gran numero di soluzioni progettuali in tempi brevi

Svantaggi di processo e prodotto

- Necessità di strumenti virtuali e software
- Imprevedibilità delle forme
- Mancanza di feedback tattile
- Necessità di tutti gli input progettuali da fornire al software prima di conoscere il risultato finale
- Assenza di varietà stilistica nei risultati (estetica organica molto predominante)
- Interazione tra designer e software non sempre semplice e immediata
- Errori frequenti nella generazione dei risultati
- Necessità dell'intervento umano per la rielaborazione dei risultati

Tabella 5.2
Elenco dei principali vantaggi e svantaggi della progettazione generativa [125, 128].

5.9 Le applicazioni

Questa tecnologia, conosciuta per la sua versatilità, può essere applicata in settori molto diversi: dai trasporti all'architettura, fino ai beni di consumo e alla moda, sempre con l'obiettivo di ottimizzare peso e resistenza, oltre che per esplorare nuovi linguaggi espressivi.

Nell'industria aerospaziale, ad esempio, il design generativo consente di sviluppare componenti resistenti e al contempo molto leggeri, migliorando l'efficienza dei veicoli e riducendo il consumo di carburante. Nel mondo della produzione automobilistica, invece, è utilizzato per la riduzione del peso delle parti meccaniche o l'integrazione di più funzioni in un unico componente. Così facendo, è possibile ridurre i costi di produzione e accelerare il processo di sviluppo, consentendo ai produttori di immettere sul mercato veicoli in tempi più rapidi. Anche nei settori più orientati al consumatore, come quello delle attrezzature sportive, il design generativo gioca un ruolo chiave. Gli algoritmi permettono di creare attrezzature che raggiungono livelli di prestazione mai visti prima, bilanciando perfettamente leggerezza, resistenza e costo. Oltretutto, grazie alla possibilità di generare forme in tempi brevi e in modo automatizzato, sarà possibile realizzare prodotti personalizzati per ogni utente, abbracciando pienamente la filosofia del "design for each"⁷⁴.

⁷⁴. Approccio progettuale che si pone come obiettivo quello di creare prodotti personalizzati e adattabili alle esigenze specifiche di ciascun individuo, valorizzando diversità e unicità anziché progettare soluzioni standardizzate.

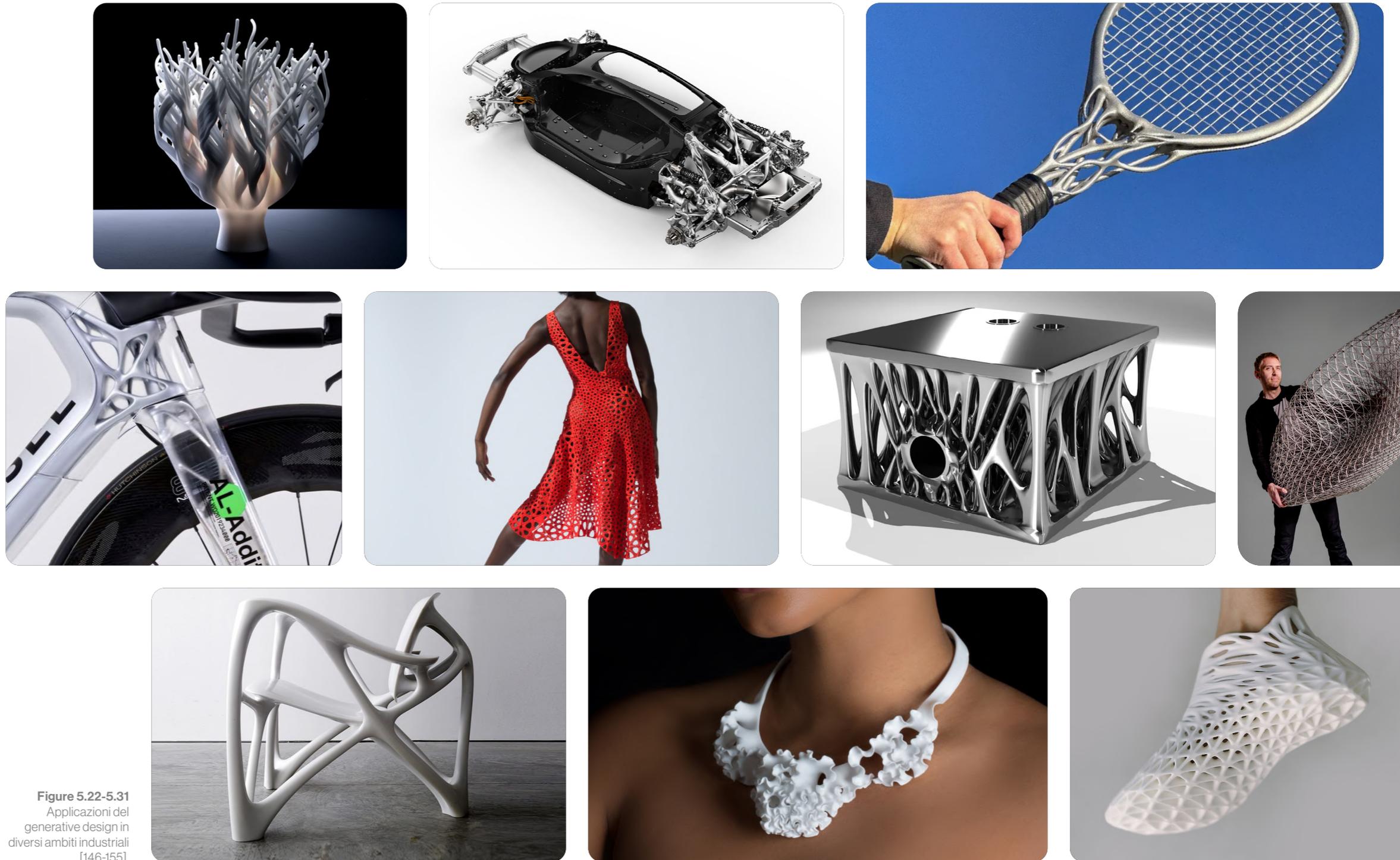


Figure 5.22-5.31
Applicazioni del generative design in diversi ambiti industriali [146-155].



Figura 5.32
Banyan Eco Wall, muro auto-irrigante progettato con il generative design e stampato in 3D, Mirek Claßen, Tobias Storz, Lindsay Lawson, BigRep, 2020 [156].

In futuro, il design generativo non sarà limitato a settori tecnici come l'aerospaziale o la produzione industriale, ma potrà trovare applicazione anche in ambiti più vicini alla vita quotidiana. Con l'aumento dell'accessibilità di questi strumenti, un numero sempre maggiore di persone potrà trarne beneficio. La sinergia tra la visione umana e le possibilità offerte dai software porterà a soluzioni che, oltre ad essere più funzionali, avranno anche un impatto più profondo. Naturalmente, questa trasformazione richiederà un cambiamento nel modo di concepire il design. Gli algoritmi, per quanto performanti, non sono una risposta universale: il loro utilizzo deve essere ponderato per capire quando possono offrire un reale valore aggiunto. Sarà pertanto fondamentale formare progettisti in grado di combinare senso critico, creatività e conoscenza tecnica di questi strumenti.

Le scaffalature

Lo scaffale, elemento fondamentale nell'arredo domestico e professionale, ha attraversato una notevole evoluzione nel corso della storia del design, trasformandosi da semplice struttura funzionale a icona di stile e innovazione. Sebbene in questa tesi venga considerato principalmente come terreno di sperimentazione per la progettazione dei giunti, analizzarne l'evoluzione, il ruolo e le modalità di utilizzo e connessione risulta un passo fondamentale per comprenderne le caratteristiche e le esigenze progettuali.

6

6.1 Lo scaffale

Il termine “scaffale” ha origini molto antiche: deriva infatti dal longobardo “ska-fa”, che significa “stipo”⁷⁵ o “palchetto” [158]. Nel tempo, questo elemento d’arredo si è evoluto, diventando uno strumento fondamentale per organizzare e conservare oggetti di ogni tipo. Gli scaffali rappresentano un elemento d’arredo utilizzato per organizzare e conservare in modo ordinato oggetti di varie tipologie e dimensioni, solitamente piccole e medie, e si trovano praticamente ovunque: nelle case, nelle biblioteche, nei negozi e in tutti quei luoghi dove vi è una necessità di esporre o riporre degli oggetti. La loro struttura è semplice ma versatile: una serie di ripiani orizzontali, sostenuti da montanti o pannelli verticali, che possono essere realizzati con una grande varietà di materiali, dal legno al metallo, dal vetro alla pietra, fino ai materiali polimerici moderni [159]. A seconda delle esigenze, gli scaffali possono essere fissi o mobili, aperti oppure chiusi con eleganti ante trasparenti, capaci di trasformare anche un oggetto funzionale in un elemento di design.

75. Piccolo mobile chiuso da uno sportello, utilizzato tradizionalmente per conservare oggetti preziosi o documenti, comune in epoche passate, soprattutto nelle abitazioni signorili [157].

Figura 6.1
Billy, una delle più celebri librerie in legno della storia del design, Gillis Lundgren, IKEA, 1979 [160].



6.2 Classificazione delle scaffalature

Gli scaffali sono molto più di semplici strutture per riporre oggetti: la loro funzione e il loro design si sono evoluti nel tempo per rispondere a diverse esigenze. In generale, vengono perciò classificati in base alle tre funzioni principali: riporre, esporre e conservare.

Riporre

Quando si tratta di riporre oggetti, il modello più comune è lo scaffale aperto, con ripiani orizzontali sostenuti da montanti verticali. In passato, gli scaffali artigianali erano spesso decorati e realizzati su misura per armonizzarsi con l'ambiente. Oggi, invece, dominano i sistemi modulari industriali, che spaziano dalle semplici strutture in metallo a basso costo fino a soluzioni sofisticate, con design avanzati, materiali di pregio e ripiani regolabili. Questi modelli trovano il loro maggiore impiego in uffici e abitazioni [159].



Figura 6.2
Scaffale a ripiani orizzontali fissato alla parete [161].

Esporre

Per quanto riguarda l'esposizione, gli scaffali variano a seconda del contesto. Nei negozi, ad esempio, si trovano sia scaffali aperti, pensati per rendere i prodotti facilmente accessibili, sia modelli chiusi con vetri, ideali per proteggere e valorizzare gli articoli più delicati [159]. Nei musei, invece, gli scaffali seguono criteri di sicurezza più stringenti, con soluzioni progettate per proteggere e valorizzare gli oggetti esposti⁷⁶.

76. In questo contesto specifico, essendo fondamentale preservare il contenuto, gli scaffali rientrano anche nella categoria del "conservare".



Figura 6.3
Scaffale espositivo da museo [162].

Conservare

Infine vi è la funzione della conservazione, legata a contesti in cui gli oggetti devono essere protetti e custoditi nel tempo. Qui rientrano gli scaffali chiusi, dotati di ante o cassetti, spesso associati a archivi o magazzini. Questi sistemi sono studiati per garantire non solo ordine, ma anche protezione da polvere, umidità o altre condizioni ambientali che potrebbero danneggiare il contenuto.



Figura 6.4
Scaffale con ante in vetro per conservare oggetti fragili [163].

6.3 L'evoluzione storica dello scaffale

Lo scaffale, pur essendo un elemento d'arredo apparentemente semplice, ha attraversato un'evoluzione straordinaria che lo ha trasformato da struttura puramente funzionale a icona di design [164]. Analizzarne la storia significa esplorare non solo il progresso delle tecniche costruttive e dei materiali, ma anche i cambiamenti nelle esigenze abitative, nelle tendenze culturali e artistiche che hanno modellato gli interni delle case nel tempo.

Le origini

Lo scaffale, nella sua forma più antica, affonda le radici molto più lontano di quanto si possa immaginare. Una delle prime testimonianze di strutture simili risale al 544 d.C., con le librerie girevoli cinesi chiamate *zhuàn lún zàng* (Figura 6.5). Inventate, secondo la tradizione, da un uomo di nome Fu Xi, vennero ampiamente adottate sotto la dinastia Song⁷⁷, quando l'imperatore Taizu promosse la stampa di massa delle scritture buddiste per diffonderle su larga scala [167].

Anche nell'antica Roma esistevano forme rudimentali di scaffalature, usate soprattutto nelle ricche domus per conservare i manoscritti. In questi anni Seneca⁷⁸, nel suo libro "De tranquillitate animi" in cui critica l'aristocrazia romana, scrisse: "Che motivo hai di giustificare un uomo che si procura librerie fatte di legno di cedro e di avorio, che va in cerca di raccolte di autori o ignoti o screditati e tra tante migliaia di libri sbadiglia, a cui dei suoi volumi piacciono soprattutto i frontespizi e i titoli? [...] a casa dei più pigri vedrai [...] scaffali che arrivano fino al soffitto; ormai infatti tra i bagni e le terme si tiene lustra anche la biblioteca come un ornamento necessario della casa. E lo potrei giustificare, certo, se si sbagliasse per troppa passione per gli studi: ora codeste opere di sacri ingegni ricercate e suddivise con i loro ritratti vengono procurate per abbellire e decorare le pareti [169]".

Fino all'invenzione della stampa a caratteri mobili⁷⁹, i libri erano rari e riservati a pochi privilegiati. Venivano scritti a mano, custoditi in scatole e trasportati dagli studiosi. Solo con la rivoluzione tipografica di Gutenberg la produzione di libri si democratizzò, creando la necessità di mobili appositi dedicati alla loro conservazione.

77. Dinastia che regnò sulla Cina dal 960 al 1279. Fu fondata dall'imperatore Song Taizu [166].

78. Filosofo, drammaturgo e politico romano (4 a.C.-65 d.C.), fu tra i massimi esponenti dello stoicismo eclettico di età imperiale [168].

79. Tecnica di stampa basata sull'uso di elementi mobili per riprodurre testi su un supporto di carta. Fu inventata in maniera indipendente in Cina (dall'inventore Bi Sheng, nel 1041, con caratteri in terracotta) e in Europa (dal tedesco Johannes Gutenberg, nel 1453-55, con caratteri in metallo). In Europa il primo libro che venne stampato fu la Bibbia [170].

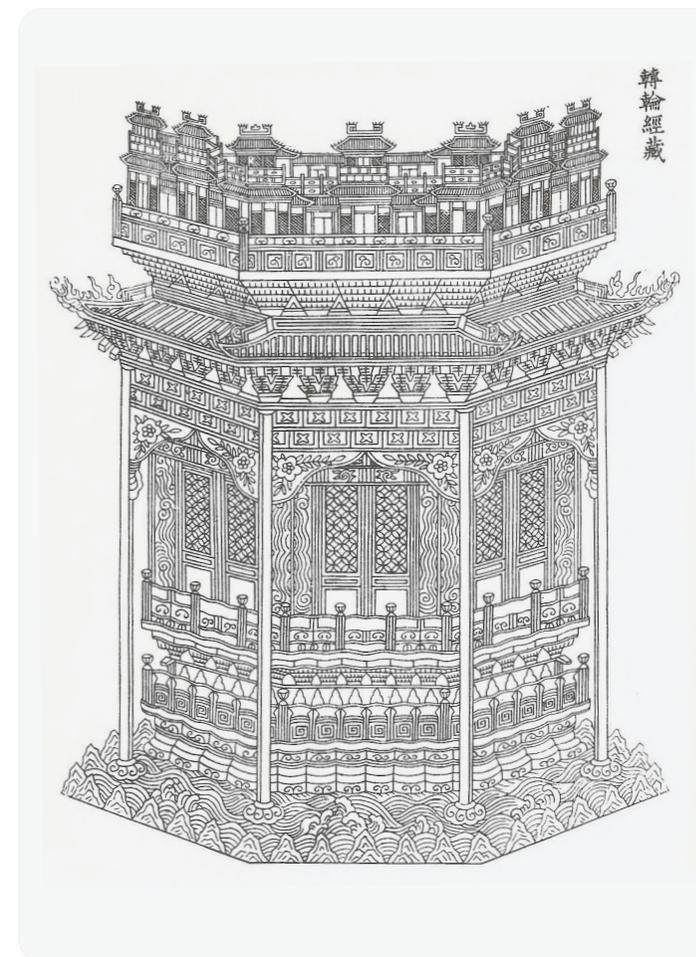


Figura 6.5

Illustrazione di una libreria girevole *zhuàn lún zàng*, dal cinese 轉輪藏, raffigurata nel trattato di architettura "Yingzao Fashi" di Li Jie, XII d.C. [165].

Da arredo a icona

Ma quand'è che lo scaffale iniziò a trasformarsi da semplice contenitore a vero e proprio elemento di design?

Un punto di partenza simbolico per l'evoluzione dello scaffale moderno può essere individuato nella Great Exhibition⁸⁰ del 1851 a Londra. Questo evento, celebrazione dell'industria e del design dell'epoca, mise in evidenza l'uso di materiali industriali come il ferro e il vetro, destinati a influenzare profondamente l'arredo.

Tra le figure di rilievo di questo evento c'è Henry Cole, che fonda e dirige "The Journal of Design and Manufactures", rivista che sottolinea l'importanza del rapporto tra progettisti e produttori per sviluppare nuove idee sul design. Tra queste, centrale è quella secondo cui il ruolo del designer sia di dare forma ai processi di artificializzazione sviluppati dalla rivoluzione industriale, progettando oggetti partendo dalle nuove tecniche con cui realizzarli [171].

In contrapposizione a queste tendenze, nel 1888 nacque il movimento Arts and Crafts⁸¹, guidato da William Morris, che promuoveva un ritorno all'artigianato e al rigore tecnico. Gli scaffali di questo periodo erano spesso decorati e realizzati con materiali pregiati, in contrasto con l'estetica industriale. I modelli di scaffale maggiormente diffusi in questo periodo erano quelli chiusi con ante, che permettevano di conservare meglio e proteggere il contenuto (Figura 6.6).

80. Esposizione Universale organizzata da Henry Cole nel 1851. Si svolse nel Crystal Palace, una struttura in vetro e ferro progettata da Joseph Paxton. L'evento aveva l'obiettivo di celebrare i progressi industriali dell'epoca, presentando manufatti e innovazioni provenienti da tutto il mondo [171].

81. Movimento artistico e sociale nato in Gran Bretagna alla fine del XIX secolo che si opponeva alla produzione industriale [171].



Figura 6.6
The Backgammon Players, mobile in legno dipinto da Sir Edward Burne-Jones, Philip Webb, Morris, Marshall, Faulkner & Co., 1861 [172].

La razionalità modernista

All'inizio del Novecento, lo scaffale subì una trasformazione radicale sotto l'influenza del Movimento Modernista⁸². La scuola del Bauhaus⁸³ (1919-1933), guidata da figure come Walter Gropius e Marcel Breuer, introdusse l'idea che il design dovesse essere funzionale, accessibile e privo di ornamenti superflui [171].

Un esempio iconico è il lavoro di Breuer, che utilizzò il tubolare metallico per creare mobili leggeri ed essenziali, ancora oggi considerati icone del design.

Durante questo periodo, la tipologia dello scaffale si diversificò, ed emersero così tre diverse forme principali: lo scaffale libreria tradizionale a parete, pensato per sfruttare le superfici verticali delle stanze; lo scaffale a ripiani sospesi, una soluzione che conferiva leggerezza visiva e adattabilità ai nuovi spazi moderni; infine lo scaffale autoportante, capace di stare in piedi da solo, utilizzato come divisorio per organizzare gli spazi interni sempre più fluidi e aperti.

82. Movimento artistico, architettonico e culturale emerso nel corso del XX secolo, caratterizzato dall'abbandono degli stili decorativi tradizionali in favore di un design funzionale [171].

83. Scuola di arte, design e architettura fondata da Walter Gropius in Germania nel 1919 [171].



Figura 6.7
B22, scaffale con struttura in tubolare d'acciaio cromato e ripiani in legno, Marcel Breuer, Thonet, 1928. [173]

Gli anni del dopoguerra

Negli anni '50 e '60, la progettazione di arredi fu caratterizzata da una forte spinta verso la modularità e la personalizzazione. Questo periodo vide l'ascesa di designer come Charlotte Perriand e Charles Eames, autori di sistemi flessibili che univano estetica e funzionalità (Figura 6.8), mentre aziende come IKEA rivoluzionarono il mercato rendendo il design dei mobili accessibile a tutti. Un esempio significativo è il Sistema String (Figura 6.9), progettato nel 1949. Questo mobile, leggero e facilmente configurabile, divenne un simbolo dello stile scandinavo [175]. Ancora oggi è popolare e rappresenta uno dei più conosciuti esempi di arredo modulare.

Gli scaffali di questo periodo riflettevano l'idea di uno stile di vita dinamico e adattabile, in linea con i cambiamenti sociali ed economici del dopoguerra⁸⁴.

84. Pieno periodo della ricostruzione dopo gli avvenimenti della Seconda Guerra Mondiale.



Figura 6.8 ↗
Nuage, scaffale bifacciale colorato, Charlotte Perriand, 1952. [174]

Figura 6.9 →
String, sistema modulare regolabile, Nils Strinning, 1949. [175]

Le nuove sperimentazioni

Con l'arrivo degli anni '70 e '80, la libreria divenne un terreno fertile per la sperimentazione e l'espressione artistica. Diversi designer osano e trovano maniere sempre più innovative per rivoluzionare i sistemi di scaffalatura. Un esempio è Vico Magistretti, che con la sua Nuvola Rossa (Figure 6.12 e 6.13), nel 1977, diede vita allo scaffale pieghevole, pensata per adattarsi agli spazi moderni e alle nuove esigenze delle persone.

Negli stessi anni, movimenti come Alchimia⁸⁵ e Memphis⁸⁶, guidati da uno spirito di reazione al movimento Modernista, rivoluzionano il concetto di arredamento, sfidando le convenzioni estetiche e funzionali. Con un nuovo approccio al design, incentrato sul recupero dell'artigianalità, si dedicano a una progettazione altamente artistica [171]. Un esempio iconico è la libreria Carlton (Figura 6.14) di Sottsass, un pezzo che combina colori vivaci, forme geometriche e un approccio ludico al design. Questo tipo di scaffale non era più solo un contenitore, ma un protagonista dello spazio, capace di trasmettere emozioni e raccontare una storia.

85. Fondata nel 1976 da Alessandro Guerriero, è un collettivo che si concentra su una progettazione molto artistica, privilegiando il pezzo unico rispetto alla produzione in serie.

86. Nato nel 1981 da Ettore Sottsass in seguito ad un distacco da Alchimia. Pur condividendo la visione artistica e provocatoria di Alchimia, Memphis esplora la possibilità di una produzione seriale degli oggetti.



Figura 6.10 ↗
Nuvola Rossa, libreria pieghevole aperta (a sinistra) e chiusa (a destra), Vico Magistretti, Cassina, 1977. [176]

Figura 6.11 →
Carlton, libreria colorata simbolo del gruppo Memphis, Ettore Sottsass, Memphis, 1981. [177]



La funzione strutturale

Se da un lato la scaffalatura ha assunto un ruolo espressivo e di design negli ambienti domestici e commerciali, dall'altro ha mantenuto la sua funzione primaria di struttura portante⁸⁷, diventando un elemento imprescindibile nel settore industriale⁸⁸. Fin dalla metà degli anni '50, con la diffusione delle scaffalature metalliche, il mondo dello stoccaggio ha subito una trasformazione radicale, dettata dall'esigenza di maggiore capacità di carico e ottimizzazione degli spazi [178].

Dopo la Seconda Guerra Mondiale, l'introduzione del pallet⁸⁹ come unità standardizzata per il trasporto merci ha reso necessaria la progettazione di scaffali capaci di sostenere pesi elevati. Inizialmente realizzate in legno, le strutture per lo stoccaggio si sono progressivamente evolute con l'uso del metallo, garantendo maggiore resistenza e durata nel tempo (Figura 6.13). Prima venivano utilizzati sistemi di fissaggio a bulloni, che rendevano gli scaffali solidi ma con lunghi tempi di assemblaggio. Successivamente furono introdotti diversi sistemi ad incastro, più rapidi da montare e in grado di garantire maggiore stabilità e sicurezza (Figura 6.12).

87. La funzione di riporre e conservare gli oggetti e sopportare carichi senza deformazioni o cedimenti.

88. Esistono però anche in ambito domestico scaffalature che privilegiano l'efficienza rispetto al design.

89. Introdotto su larga scala per ottimizzare la movimentazione delle merci con sistemi di sollevamento a forche.



Figura 6.12
Dettaglio dell'aggancio di uno scaffale metallico ad incastro [179].



Figura 6.13
Magazzino con scaffalature metalliche ad incastro per pallet [180].

Oggi le scaffalature industriali rappresentano un pilastro fondamentale per il settore della logistica e dello stoccaggio. Che si tratti di scaffali porta pallet, sistemi a ripiani o soluzioni automatizzate per grandi magazzini, queste strutture rimangono elementi chiave per la gestione efficiente delle merci.

Pur essendo spesso trascurate dal punto di vista estetico, la loro ingegnerizzazione e continua innovazione dimostrano quanto siano essenziali per il funzionamento di numerosi settori produttivi.

6.5 Le connessioni nelle scaffalature

La progettazione delle connessioni nelle scaffalature ha da sempre rappresentato una sfida centrale per i progettisti, diventando un elemento cruciale per garantire stabilità, funzionalità e durabilità. A partire dal XX secolo, con l'introduzione di nuovi materiali e l'evoluzione delle tecniche di produzione e assemblaggio, i designer di fama mondiale hanno dedicato particolare attenzione alla creazione di sistemi di connessione innovativi, che non solo migliorano la praticità e la sicurezza, ma contribuiscono anche all'estetica complessiva dello scaffale, ridefinendo gli standard dell'arredamento contemporaneo.

Di seguito verranno analizzati i principali metodi di giunzione utilizzati per le scaffalature; ognuna di queste è stata esaminata attraverso l'analisi di uno scaffale rappresentativo, scelto per mettere in evidenza le caratteristiche tecniche, i vantaggi e gli svantaggi di ciascun sistema di giunzione. L'obiettivo è fornire una panoramica chiara e comparativa, utile per comprendere come le varie soluzioni disponibili sul mercato possano rispondere alle esigenze degli utenti, in termini di resistenza, modularità e facilità di montaggio.

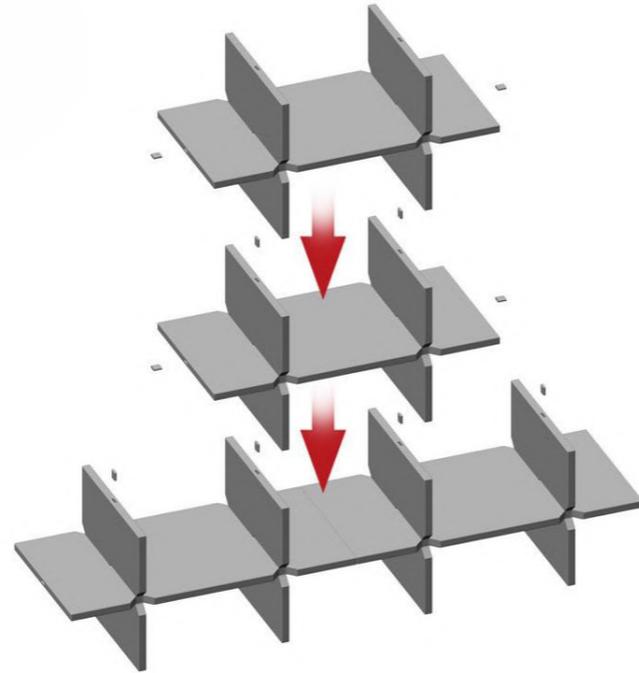
Figura 6.15
Fase di assemblaggio di
una scaffalatura [181].



SOLO

Connessione semplice con
montaggio a incastro

Produttore	Tojo Möbel
Designer	Bastian Prieler
Tipologia	Scaffale modulare in MDF
Anno produzione	2020



Il modulo di base può essere usato per creare scaffali stabili modulari ed è montato unicamente attraverso gli incastri e gli intagli. Non richiede nessun tipo di attrezzatura. I vari moduli di base, invece, sono connessi gli uni agli altri tramite spine che conferiscono stabilità allo scaffale. Gli scaffali realizzabili possono essere composti da 6, da 8 o da 12 moduli di base.

Figura 6.16 ↑
SOLO, schema di montaggio, Bastian Prieler, Tojo Möbel, 2020 [182].

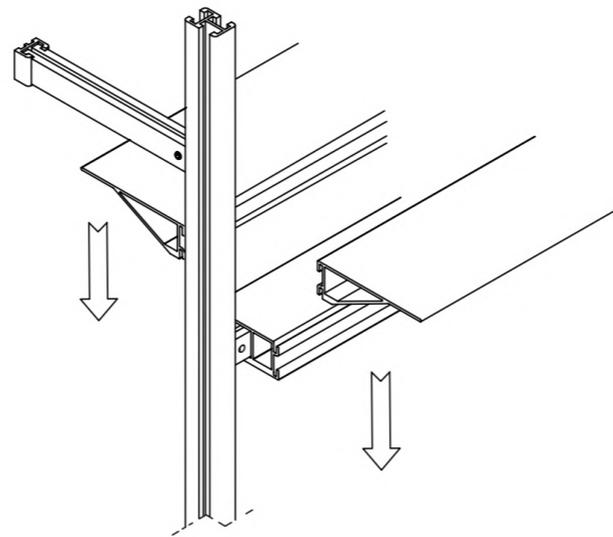
Figura 6.17 →
SOLO, scaffale modulare in MDF, Bastian Prieler, Tojo Möbel, 2020 [182].



Hypóstila

Connessione complessa
con montaggio articolato

Produttore	BD Barcelona Design
Designer	Oscar Tusquets Blanca, Lluís Clotet
Tipologia	Libreria a parete in alluminio
Anno produzione	1979



È una scaffalatura composta da montanti e traverse che sono profilati estrusi di alluminio. L'elemento strutturale principale della scaffalatura è la traversa centrale di sostegno che si connette ai montanti dello scaffale sfruttando gli incastri delle geometrie dei profili estrusi, i quali funzionano come delle guide di scorrimento. La traversa viene poi bloccata in posizione ad un'altezza a piacere tramite l'uso di grani filettati (viti senza testa) che, una volta avvitati, fanno generare ai due componenti

della traversa una forza di compressione verso l'esterno, bloccando l'intera struttura, che lavora quindi in espansione. Sulla traversa centrale vengono poi montati i ripiani che, sfruttando le geometrie dei loro profili, si incastrano per opposizione e per gravità. Se da un lato questa configurazione consente di avere un elevato grado di purezza formale e di flessibilità nella configurazione, dall'altro, data l'elevata quantità di componenti, il montaggio risulta macchinoso e poco intuitivo.

Figura 6.18 ↑
Hypóstila, schema di montaggio, BD Barcelona Design, Oscar Tusquets Blanca e Lluís Clotet, 1979 [183].

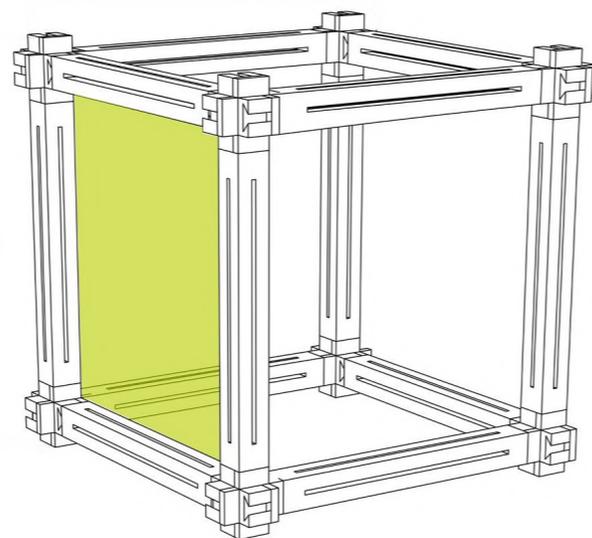
Figura 6.19 →
Hypóstila, scaffale a scorrimento in alluminio, BD Barcelona Design, Oscar Tusquets Blanca e Lluís Clotet, 1979 [183].



KEIGIO® SHELF

Connessione con
giunto per forma

Produttore	KEIGIO
Designer	Giovanni Bruni
Tipologia	Libreria a giorno autoportante modulare
Anno produzione	2021



È un sistema modulare di scaffalatura composto da sole aste in alluminio pressofuso connesse tra loro mediante un giunto per forma con un sistema di incastro a coda di rondine. Le aste presentano inoltre dei fori per incastrare i piani realizzati in acciaio o in vetro. La struttura è facilmente assemblabile, non richiede componenti o attrezzature aggiuntive, è autoportante e offre un'ampia flessibilità nella configurazione.



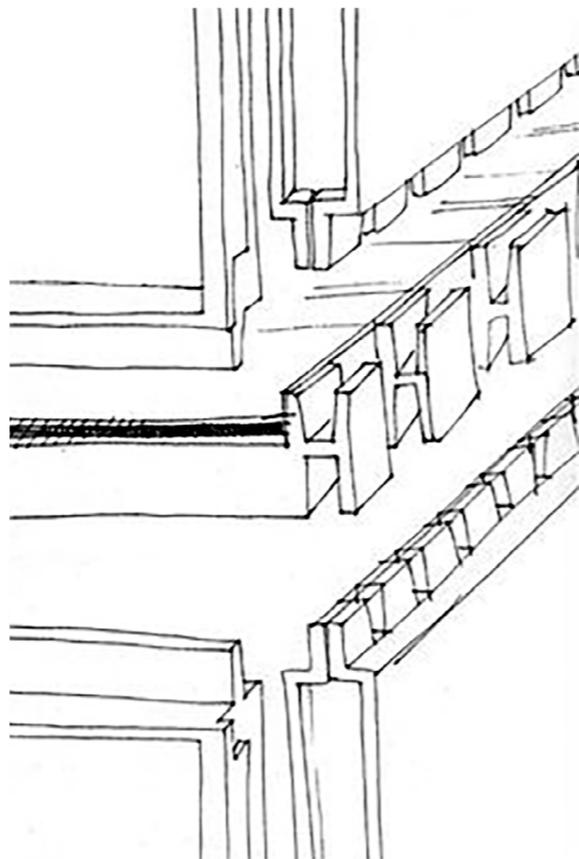
Figura 6.20 ↑
KEIGIO® SHELF,
schema di montaggio,
Giovanni Bruni, KEIGIO,
2021 [184].

Figura 6.21 →
KEIGIO® SHELF,
scaffale modulare auto-
portante,
Giovanni Bruni,
KEIGIO, 2021 [185].

Glifo

Connessione con
giunto per forma

Produttore	Gavina
Designer	Enzo Mari
Tipologia	Libreria modulare
Anno produzione	1966



Gli elementi della libreria sono il piano, il fianco, il fondo e il piede. Grazie alle connessioni basati unicamente su un sistema di incastri, il montaggio risulta semplice e rapido. La libreria è leggera, per le caratteristiche del materiale plastico utilizzato e per la struttura degli elementi, ma allo stesso tempo resistente grazie alle nervature.

Figura 6.22 ↑
Glifo, schema di
montaggio, Enzo Mari,
Gavina, 1966 [186].

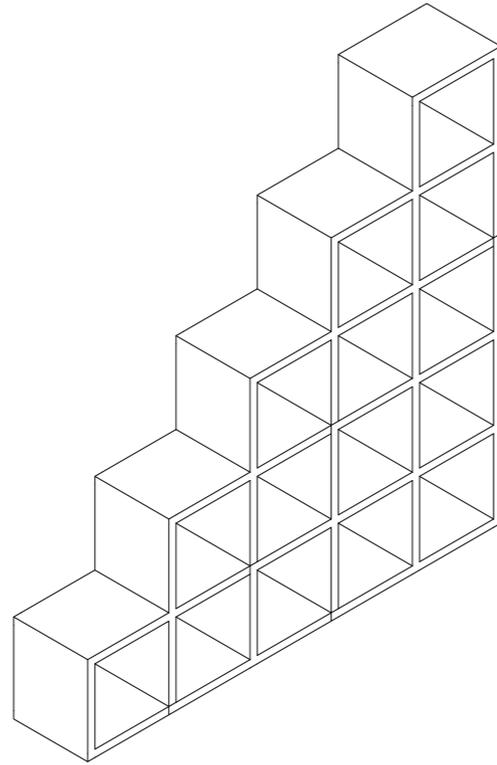
Figura 6.23 →
Glifo, libreria modulare
a incastro, Enzo Mari,
Gavina, 1966 [187].



Polvara

Connessione con
giunto per forma

Produttore	Kartell
Designer	Giulio Polvara
Tipologia	Libreria modulare a giorno in ABS
Anno produzione	1975



Gli elementi della libreria sono il piano, il fianco, il fondo e il piede. Grazie alle connessioni basati unicamente su un sistema di incastri, il montaggio risulta semplice e rapido. La libreria è leggera, per le caratteristiche del materiale plastico utilizzato e per la struttura degli elementi, ma allo stesso tempo resistente grazie alle nervature.

Figura 6.24 ↑
Polvara, schema di
montaggio, Giulio Polvara,
Kartell, 1975 [188].

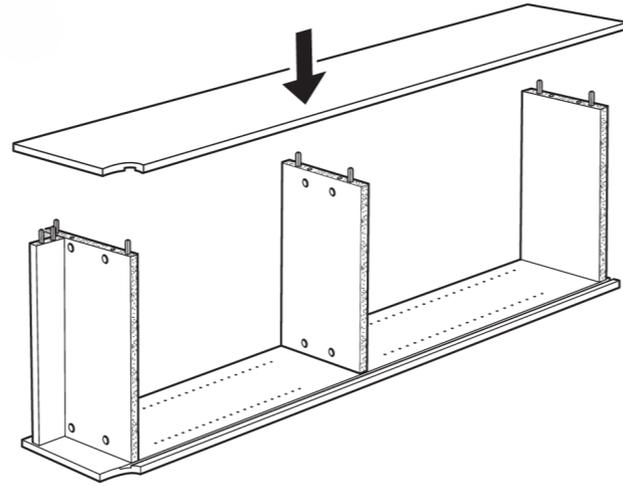
Figura 6.25 →
Polvara, libreria modulare in
ABS, Giulio Polvara, Kartell,
1975 [188].



Billy

Connessione standard per
accessibilità economica

Produttore	IKEA
Designer	Gillis Lundgren
Tipologia	Libreria a parete in legno
Anno produzione	1979



La libreria Billy è uno degli articoli più iconici di IKEA. Progettata per essere economica, versatile e facile da montare, è diventata un elemento essenziale in milioni di case in tutto il mondo. Grazie al suo design sobrio e funzionale si adatta a ogni stile di arredamento ed è disponibile in diverse finiture e dimensioni. Il sistema Billy utilizza una serie di giunture standard, progettate per garantire facilità di montaggio e smontaggio, oltre a un costo di produzione contenuto. Le giunture fanno uso di perni metallici, bussole avvitabili, spine di legno e giunzioni Cam-Lock (Minifix) tipiche di IKEA.

Figura 6.26 ↑
Billy, schema di montaggio, Gillis Lundgren, IKEA, 1979 [189].

Figura 6.27 →
Billy, libreria standard in legno, Gillis Lundgren, IKEA, 1979 [189].



Veliero

Connessione oltre le
convenzioni tramite tiranti

Produttore	Cassina
Designer	Franco Albini
Tipologia	Libreria in legno e vetro
Anno produzione	1940

Disegnata da Franco Albini nel 1940, Veliero è una libreria a giorno composta da montanti in legno e ripiani in vetro che sfida le leggi della fisica sfruttando un sistema di connessione basato sull'uso di tiranti. Grazie a questo sistema di connessione, la poetica di sottrazione alla base della struttura, crea intervalli atmosferici di aria e luce che sembrano far galleggiare i libri e gli oggetti nello spazio.

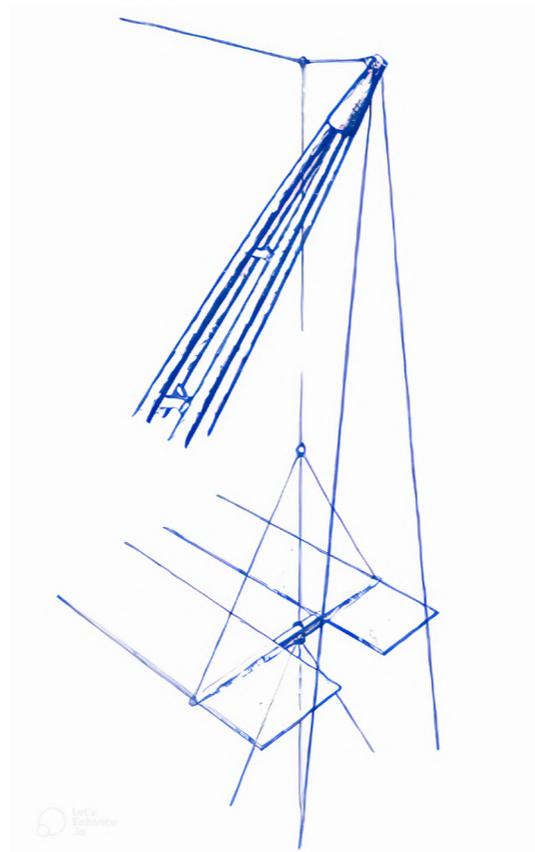


Figura 6.30 ↑
Veliero, schema di
montaggio, Franco Albini,
Cassina, 1940 [192].

Figura 6.31 →
Veliero, Riedizione della
celebre libreria, Franco
Albini, Cassina, 2011
[193].



La sperimentazione progettuale

Il progetto si propone di esplorare il potenziale della fabbricazione digitale e delle tecniche di progettazione computazionale per sviluppare delle connessioni innovative, mettendo in dialogo sperimentazione formale, materiali sostenibili e processi produttivi avanzati. Il fine è individuare soluzioni progettuali che favoriscano l'auto-costruzione e la condivisione open source, contribuendo alla diffusione di un nuovo modo di fare bricolage con il supporto delle nuove tecnologie.

7

7.1 I requisiti

L'obiettivo della tesi è lo sviluppo di connessioni basate su giunti per forma per unire aste e piani, elementi di base della geometria spaziale. La ricerca si concentra sulla creazione di soluzioni che siano accessibili, affidabili e compatibili con le tecniche di fabbricazione additiva a filo caldo. L'approccio adottato si inserisce in una più ampia riflessione sul design open source e sulla fabbricazione digitale come strumenti per democratizzare l'accesso all'autocostruzione e promuovere una cultura del fai da te tecnologico. Per garantire la fattibilità e l'efficacia del progetto, sono stati individuati quattro requisiti fondamentali che i giunti devono rispettare: Connessione di piani e aste senza lavorazioni aggiuntive, facilità di assemblaggio, resistenza strutturale e producibilità tramite stampa 3D domestica.

Figura 7.1
Connessione nello spazio di aste e piani in legno [194].



Costruire accessibile

Uno degli obiettivi della sperimentazione è che i giunti permettano di connettere piani e aste, componenti semplici di recupero o di facile acquisizione, senza che questi debbano essere modificati attraverso lavorazioni complesse. Lo sguardo non va ai giunti per forma, collegamenti tra due o più elementi che per loro natura richiedono lavorazioni con utensili computerizzati difficilmente accessibili, quanto alle connessioni intuitive ad incastro, come il Lego ad esempio.

I giunti sono concepiti in modo da adattarsi, con una certa tolleranza, agli elementi strutturali standard (aste e piani),

eliminando completamente la necessità di interventi particolari oltre al taglio. Le parti da assemblare potranno così essere facilmente reperibili nei negozi di bricolage, tornando con la memoria all'epoca pop in cui con mattoni e assi grezze i giovani costruivano i loro primordiali, ma funzionali, arredi.

Da qui l'uso di semilavorati in legno per la realizzazione dei piani e delle aste, ampiamente disponibili in formati standard e con un prezzo accessibile.

A tal proposito, è stato fissato un limite di spesa di 300 €, oltre il quale l'auto-costruzione della scaffalatura perderebbe la sua convenienza.

Comunicare la resistenza strutturale

La progettazione dei giunti non è solo un esercizio creativo e formale, ma anche di concetto strutturale e di come questo possa essere comunicato in modo intuitivo all'utente.

Per questo motivo la sperimentazione richiede al designer un'analisi preliminare della resistenza meccanica delle connessioni. Pertanto, per poter testare le connessioni è stato scelto come laboratorio di sperimentazione la "scaffalatura", un arredo molto diffuso in ambito domestico e professionale. L'obiettivo della tesi, tuttavia, non è progettare uno scaffale, bensì sfruttarne le potenzialità compositive e strutturali per verificare la funzionalità e l'affidabilità di connessioni sperimentali. Per garantire che le strutture realizzate con i questi giunti possano sostenere carichi adeguati, si prendono come riferimento le presta-

zioni di scaffalature standard realizzate in materiali simili, cioè in legno. Sono pertanto esclusi i modelli in metallo con connessioni bullonate o ad incastro, in quanto concepiti esclusivamente per la massima capacità di carico e quindi difficilmente comparabili con una struttura il cui punto vulnerabile potrebbe proprio essere la connessione stampata in 3D. Nonostante la prototipazione rapida consenta oggi una grande varietà di materiali performanti, si intende privilegiare quelli che possono essere reperibili più facilmente, come il PLA, a garanzia della sostenibilità e dell'impiego di macchine da stampa non costose. Una parte della ricerca è dunque dedicata al significato didattico del giunto individuando geometrie e rinforzi capaci, al contempo, di esaltare la semplicità costruttiva e la resistenza strutturale.

Costruire semplice

Un altro aspetto fondamentale del progetto è la semplicità di assemblaggio. L'esperienza del montaggio non deve essere percepita come un'attività complessa o frustrante, bensì come un processo intuitivo e soddisfacente, realizzabile senza fatica e da una sola persona. Per raggiungere questo obiettivo, i giunti devono essere progettati in modo tale da guidare l'utente nell'assemblaggio tramite incastro, riducendo al minimo gli sforzi e l'uso di strumenti.

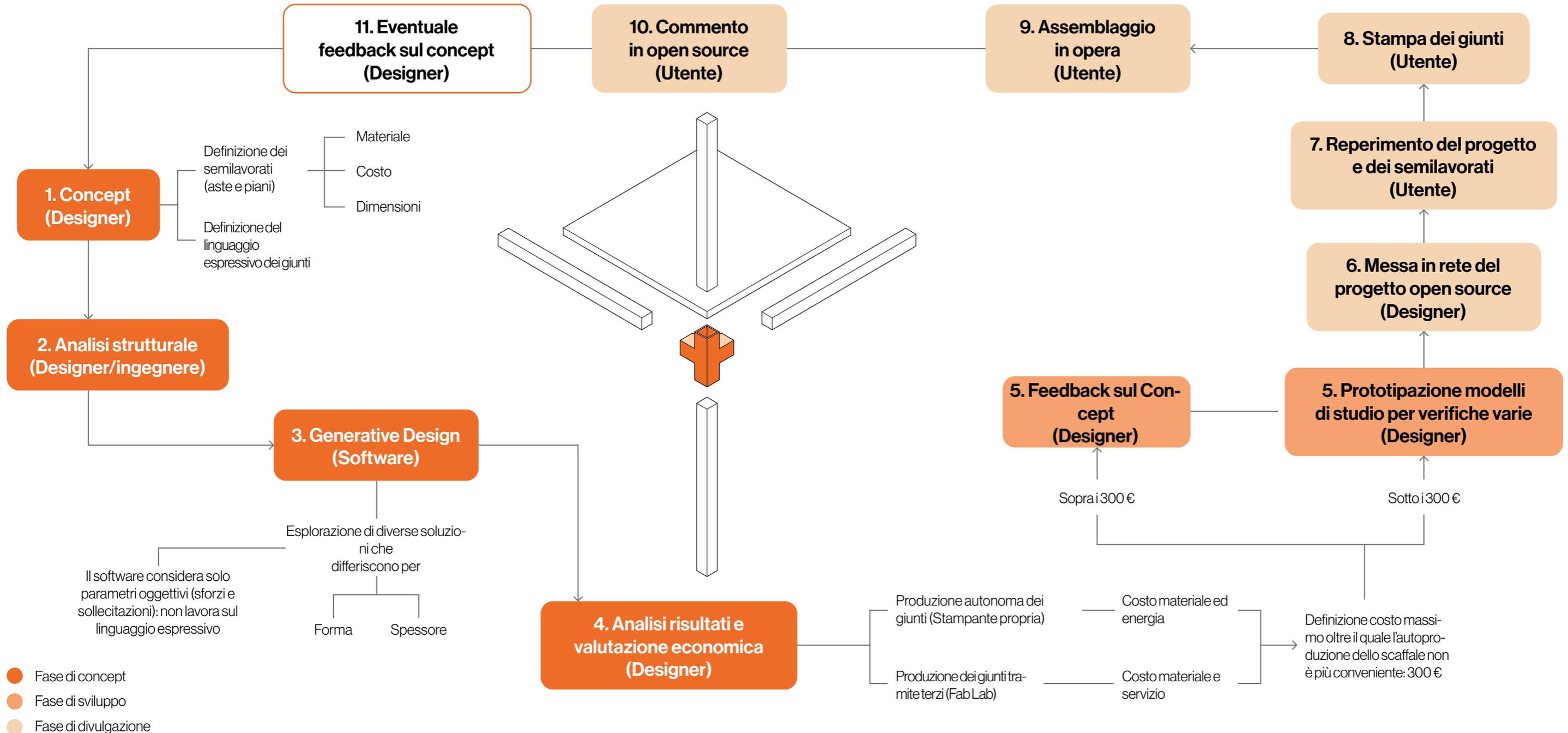
La familiarità della stampa 3D

Utilizzando lo stampaggio 3D FDM i giunti possono essere costruiti a casa o presso un service o laboratorio. Questa tecnologia additiva, sempre più diffusa nell'autocostruzione, permette di realizzare componenti "on demand"⁹⁰, senza sprechi di materiale e gestendo i tempi secondo proprie necessità se disponibile a casa propria. Affinchè le connessioni possano essere realizzate facilmente, come materiale di stampa è stato scelto il PLA. Grazie alla sua ampia disponibilità, al basso costo e alla facilità di lavorazione, è infatti diventato un materiale basilico, quello con cui iniziare un percorso sperimentale. Tuttavia, occorre puntualizzare che, a conti fatti, produrre appoggiandosi ad un service potrebbe non essere al momento una soluzione conveniente, data la lentezza che ancora caratterizza la fase di stampa e di conseguenza la gestione del processo che comunque necessita, di tanto in tanto, di sorveglianza.

Ma è anche vero che la prototipazione rapida guarda oltre il rapporto costi/benefici, come il bricolage appunto, in cui va dato il giusto peso alle motivazioni intangibili del costruire da sé, come il comprendere e l'appropriarsi di una tecnica, l'analisi della miglioria apportabile: in sostanza, tutto ciò che trasforma il consumatore di un prodotto (consumer) in un produttore/consumatore, che nel linguaggio anglosassone si traduce in prosumer. Questo approccio consente di realizzare soluzioni su richiesta, riducendo l'impatto ambientale legato alla logistica e favorendo una maggiore sostenibilità dei giunti [195]. L'accesso open source e la personalizzazione dei modelli digitali permettono inoltre di adattare i giunti alle esigenze specifiche dell'utente, prolungando la vita utile delle strutture grazie alla facilità di sostituzione e riparazione delle parti stesse.

⁹⁰. Dall'inglese "su richiesta". Si tratta di un modello produttivo in cui gli oggetti vengono realizzati solo quando richiesti, eliminando la necessità di stoccaggio e ottimizzando costi e risorse.

7.2 Connettere: schema di processo



7.3 La scelta dei componenti

La sperimentazione si è basata sull'assemblaggio di una "scaffalatura" composta da elementi modulari che possono includere piani e aste in diverse configurazioni. Per garantire la fattibilità del progetto e la sua accessibilità al grande pubblico, è stato fondamentale scegliere le dimensioni dei componenti in legno che formeranno lo scaffale sui quali basare la progettazione dei giunti. Il processo ha richiesto una ricerca di mercato al fine di individuare gli standard più diffusi e quelli più adatti in termini di reperibilità, prestazioni e costi.



Figura 7.2
Fase di scelta del materiale più adatto all'interno di un negozio di fai da te [196].

I punti vendita

Al fine di semplificare al massimo il processo di approvvigionamento dei materiali, è stata effettuata innanzitutto una ricerca sui principali punti vendita delle catene di bricolage presenti nell'area torinese. Questo ha permesso di ottenere un quadro aggiornato della disponibilità dei materiali nei negozi della zona urbana, fornendo una panoramica sulle opzioni di acquisto.

Legenda

- Leroy Merlin
- Il Guercio
- Tecnomat
- Bricofer
- Brico center
- Tuttolegno



Figura 7.3
Mappa di Torino
con evidenziati i
principali negozi di
fai da te.

I piani

Dopo un'attenta analisi delle offerte disponibili nei cataloghi di vari negozi di bricolage, lo spessore di 18 mm è stato identificato come il più adatto al progetto. Questo standard non solo è il più diffuso, ma offre anche una vasta gamma di varianti in termini di essenze lignee, finiture, dimensioni e tipologie di pannelli (tavole giuntate, semilavorati lamellari, pannelli multistrato). Dal punto di vista strutturale, i pannelli di questo spessore rappresentano un ottimo compromesso tra leggerezza e resistenza, garantendo una buona capacità di carico senza risultare eccessivamente pesanti o ingombranti. Come si evince dalla Tabella 7.1, i pannelli di spessore 18 mm risultano essere presenti in diversi formati nella maggior parte dei negozi. La tabella riporta esclusivamente i pannelli di questo spessore che possiedono una dimensione di profondità adatta alla realizzazione di scaffalature⁹¹. La seconda dimensione dei pannelli varia invece tra i 600 mm e i 2500 mm: le più piccole possono essere utilizzate direttamente, mentre quelle superiori ai 1500 mm possono essere acquistate e tagliate su misura grazie ai servizi di taglio offerti nei negozi.

⁹¹. I ripiani convenzionali di queste strutture generalmente non superano i 300 mm o 400 mm di profondità.

Tabella 7.1

Tabella delle disponibilità dei piani in legno con spessore 18 mm nei negozi di bricolage del torinese [197-202].

Sono stati scelti i piani di dimensione 400x800 mm, evidenziati in tabella, per la realizzazione delle scaffalature.

	Leroy Merlin	Il Guercio	Tecnomat	Bricofer	Brico center	Tuttolegno
Piano abete lamellare 300x600 mm spessore 18 mm	12.49 €	7.99 €	-	-	11.99 €	-
Piano abete lamellare 300x800 mm spessore 18 mm	10.49 €	8.99 €	-	-	15.90 €	7.20 €
Piano abete lamellare 300x1000 mm spessore 18 mm	13.99 €	12.19 €	6.50 €	9.75 €	10.90 €	8.70 €
Piano abete lamellare 300x1500 mm spessore 18 mm	25.89 €	12.99 €	-	-	-	12.90 €
Piano abete lamellare 300x2000 mm spessore 18 mm	33.99 €	14.59 €	12.95 €	-	23.90 €	19.60 €
Piano abete lamellare 400x600 mm spessore 18 mm	14.29 €	11.99 €	-	-	14.29 €	-
Piano abete lamellare 400x800 mm spessore 18 mm	11.99 €	11.19 €	12.50 €	-	-	9.30 €
Piano abete lamellare 400x1000 mm spessore 18 mm	9.35 €	14.99 €	8.65 €	12.21 €	12.90 €	13.00 €
Piano abete lamellare 400x1500 mm spessore 18 mm	33.89 €	16.89 €	-	-	-	17.10 €
Piano abete lamellare 400x2000 mm spessore 18 mm	17.99 €	18.19 €	17.30 €	-	26.90 €	22.80 €

Le aste

Una delle prime decisioni ha riguardato la forma della sezione trasversale⁹² delle aste. Tra le alternative disponibili si è optato per le aste in legno di abete a sezione quadrata anziché quella tonda, principalmente per via di due fattori: il primo è la disponibilità nei vari negozi; il secondo è il costo, infatti le aste a sezione tonda risultano significativamente più costose in quanto richiedono lavorazioni aggiuntive per essere trasformate in forma cilindrica. La scelta della dimensione della sezione quadrata ha richiesto poi un confronto tra le opzioni più facilmente reperibili sul mercato: 20x20 mm e 30x30 mm. Dopo un'attenta valutazione, si è deciso di adottare la dimensione 30x30 mm per via delle prestazioni strutturali che offrono. Le aste da 20x20 mm risultano infatti troppo snelle per garantire una resistenza adeguata ai carichi previsti.

Al contrario, le aste con sezioni superiori (40x40 mm o 50x50 mm) sono state scartate poiché, oltre ad essere molto pesanti fisicamente e visivamente, richiederebbero dei giunti molto grandi per poterle contenere, portando quindi ad un aumento dei costi⁹³.

La Tabella 7.2 riporta le diverse lunghezze disponibili per le aste considerate. Come evidenziato, esistono numerose opzioni di lunghezza, che possono essere acquistate e successivamente tagliate sul posto grazie ai servizi di taglio.

92. La forma che si ottiene tagliando l'asta perpendicolarmente alla sua lunghezza.

93. A causa del maggior numero di ore di stampa e di materiale.

Tabella 7.2
Tabella delle disponibilità dei listelli di legno a sezione quadrata nei negozi di bricolage del torinese [197-202]. Sono stati scelti i listelli di lunghezza 1 m e sezione 30x30 mm, evidenziati in tabella, per la realizzazione delle scaffalature.

	Leroy Merlin	Il Guercio	Tecnomat	Bricofer	Brico center	Tuttolegno
Listello in abete lunghezza 1000 mm sezione 20x20 mm	0,87 €	0,89 €	0,79 €	-	3,50 €	0,90 €
Listello in abete lunghezza 2000 mm sezione 20x20 mm	1,56 €	1,50 €	-	-	-	1,60 €
Listello in abete lunghezza 2500 mm sezione 20x20 mm	8,79 €	2,10 €	-	-	-	-
Listello in abete lunghezza 3000 mm sezione 20x20 mm	1,87 €	2,59 €	2,05 €	-	-	2,50 €
Listello in abete lunghezza 1000 mm sezione 30x30 mm	1,22 €	1,99 €	1,60 €	-	2,10 €	1,50 €
Listello in abete lunghezza 2000 mm sezione 30x30 mm	1,65 €	3,20 €	-	-	6,40 €	2,80 €
Listello in abete lunghezza 2100 mm sezione 30x30 mm	12,49 €	-	-	-	-	7,00 €
Listello in abete lunghezza 2500 mm sezione 30x30 mm	-	3,89 €	-	-	-	-
Listello in abete lunghezza 3000 mm sezione 30x30 mm	2,37 €	4,20 €	4,50 €	-	6,40 €	4,00 €

Tolleranze e fori per il fissaggio

Le aste di legno (listelli) disponibili in commercio, presentano imprecisioni superficiali essendo realizzati per taglio ma non piallati. A causa di ciò, il sistema di incastro previsto, basato sull'accoppiamento per interferenza⁹⁴, non riesce a compensare la variazione tra la misura effettiva della sezione e quella nominale⁹⁵ di 30x30 mm. L'imprecisione delle aste di legno causa una differenza nella sezione fino a 2 mm dalla dimensione nominale indicata.

Per quanto riguarda i piani in legno lamellare di abete invece non vale lo stesso discorso, poiché derivano da pannelli squadrate con precisione e quindi di spessore costante, che il brico center poi taglia a misura esatta. Quindi, per assicurare un fissaggio tra giunto e aste o piani si provvede alla foratura, non in vista, del giunto, tale da poterlo assicurare con viti.

94. Metodo di connessione tra due oggetti in cui il maschio è di dimensione leggermente superiore alla femmina.

95. Si tratta del valore di riferimento che viene assegnato alla dimensione di un prodotto.



Figura 7.4
Fase di inserimento
della vite che ancora
l'asta al giunto.

7.4 Il concept e le sue declinazioni

Come spiegato precedentemente, uno dei principali vincoli è la semplificazione del processo di montaggio e di reperibilità delle aste e dei piani senza alcun tipo di lavorazione aggiuntiva. Ciò obbliga dunque a individuare dei giunti che lavorino per contenimento di volumi, in altre parole che accolgano le aste o i piani. Con questo duplice obiettivo la sperimentazione procede con un'analisi del comportamento statico di una struttura a campione per evitare ridondanze, definita da 5 piani, 20 ritti e 20 giunti, e la successiva comparazione di soluzioni morfologiche di giunti ottenute con il supporto di un software generativo.

Figura 7.5
Dettaglio dell'asta in legno connessa tramite uno dei giunti progettati.

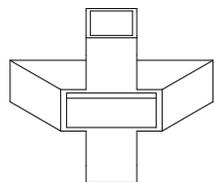


Giunto A

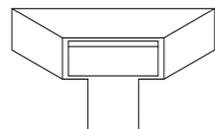
L'idea alla base di questo giunto è di connettere sia piani che aste, senza l'utilizzo di traverse che fungano da supporto per i piani. Si tratta, infatti, di un concept che riduce al minimo i componenti della scaffalatura. Il posizionamento a 45° delle aste, inoltre, conferisce maggiore resistenza strutturale alla scaffalatura e, a livello espressivo, consente di "svuotare" l'angolo, facendo fuoriuscire il piano dal giunto. Il discostamento dall'orientamento convenzionale dei montanti di una normale scaffalatura è ciò che più caratterizza e valorizza questo giunto.

Questa soluzione progettuale presenta una variante per il piano superiore: dato che non necessita di un alloggiamento per un'asta superiore, la versione propone il giunto con solo quello per l'asta inferiore.

Versioni



Versione per connettere piano e due aste (superiore e inferiore).



Versione per connettere piano e solamente un'asta (inferiore).



Tabella 7.3 ←
Le due differenti versioni del Giunto A.

Figura 7.6 →
Giunto A all'interno della struttura di piani e aste che permette di assemblare.

Giunto A

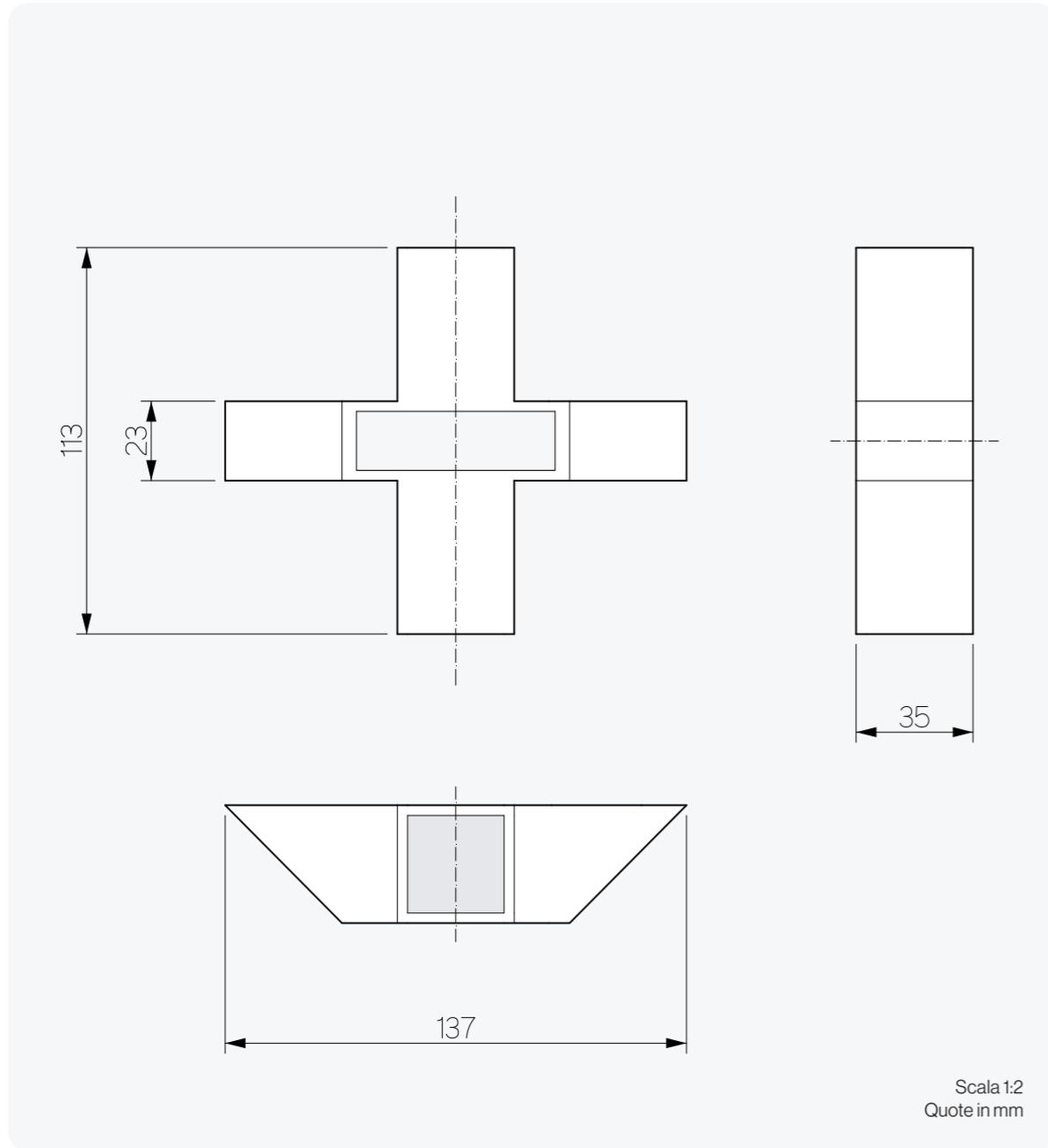


Figura 7.7
Proiezioni ortogonali del Giunto A.

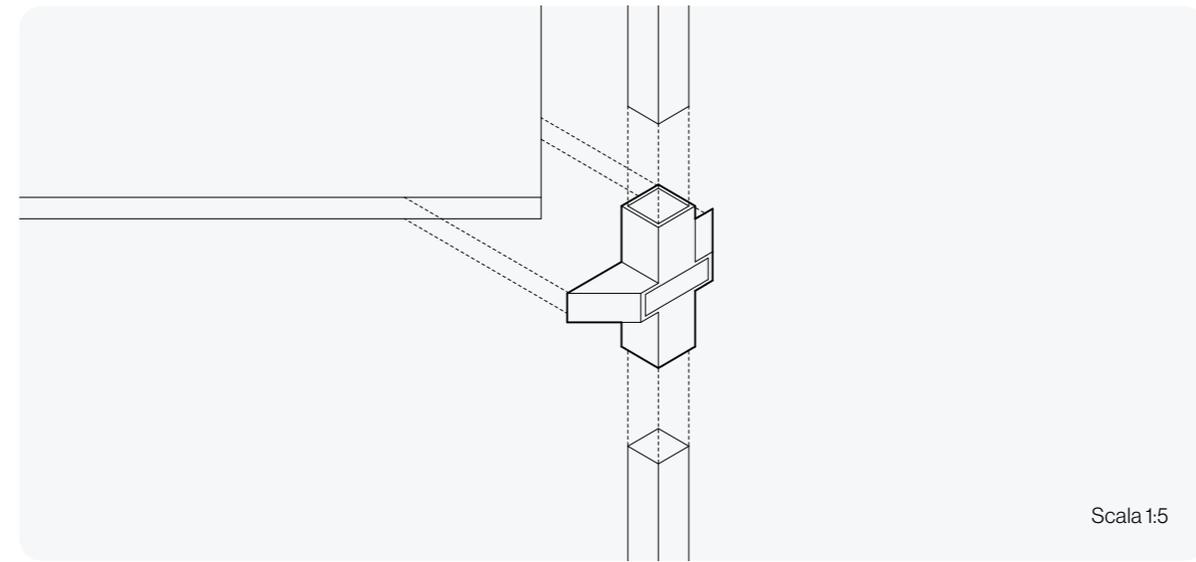


Figura 7.8 ←
Esploso assometrico del Giunto A e del metodo di inserimento nella scaffalatura di piani e aste.

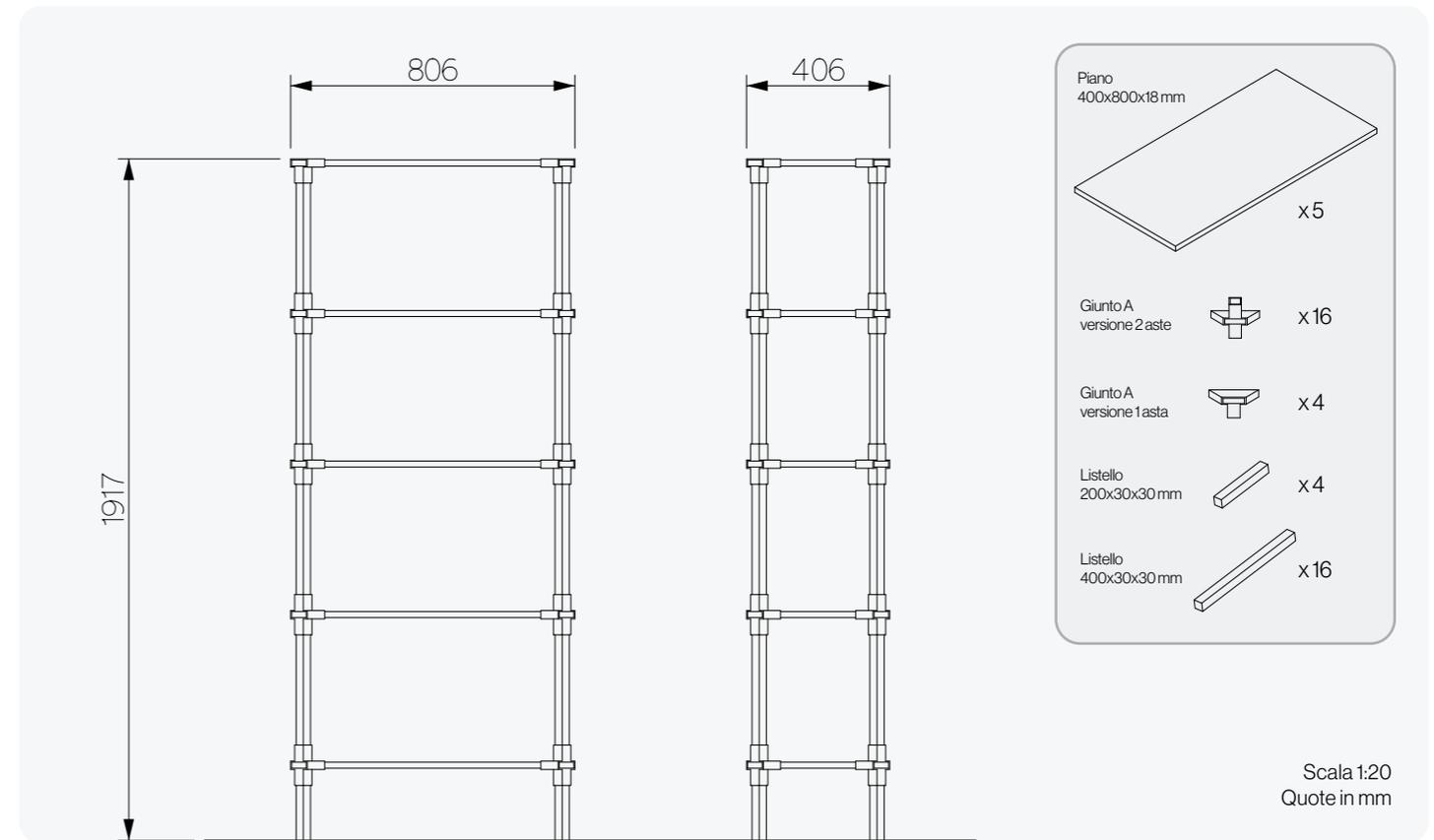


Figura 7.9 ↓
Proiezioni ortogonali e componenti di una scaffalatura a 5 piani assemblata tramite il Giunto A.

7.5 La verifica strutturale

L'obiettivo di un'analisi di verifica strutturale dei giunti è necessaria per poter ottenere un riscontro numerico circa le sollecitazioni alle quali sono sottoposti i giunti una volta montati in una scaffalatura e sottoposti ad una condizione di carico statico. Le sollecitazioni identificate saranno poi da inserire opportunamente nel software di progettazione generativa (Fusion 360), con il fine di studiare i risultati prodotti, per poterli analizzare in modo critico e successivamente di rielaborarli per ottenere le versioni finali dei giunti. Per l'analisi qui illustrata, svolta basandosi sul Giunto A, si suppone di avere una scaffalatura composta da 5 ripiani di misura 800x400 mm e 16 aste di 400 mm di lunghezza con sezione trasversale 30x30 mm, oltre ad aste/piede che possono variare in altezza⁹⁶ (Figura 7.10 e 7.11).

⁹⁶ Non vengono qui riportate le misure delle 4 aste che fungono da piedini, poiché non rilevanti. Tuttavia, ai fini della rappresentazione mostrata, sono state approximate aste di lunghezza 200 mm.

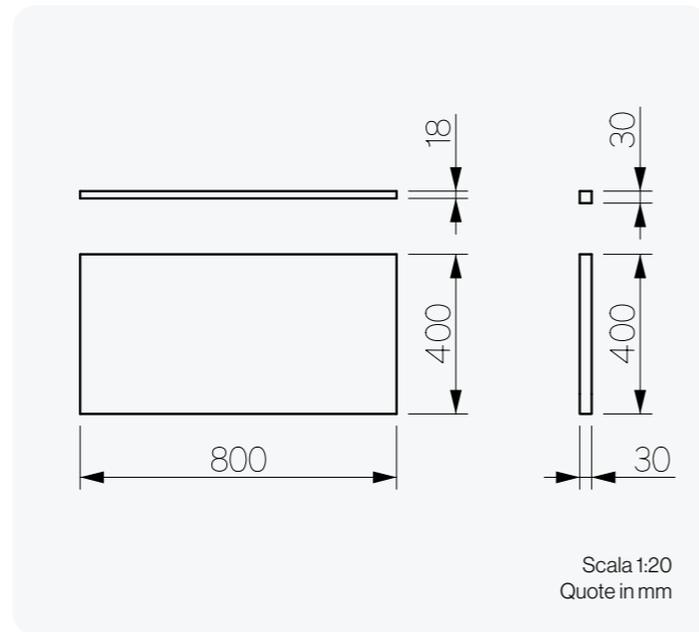
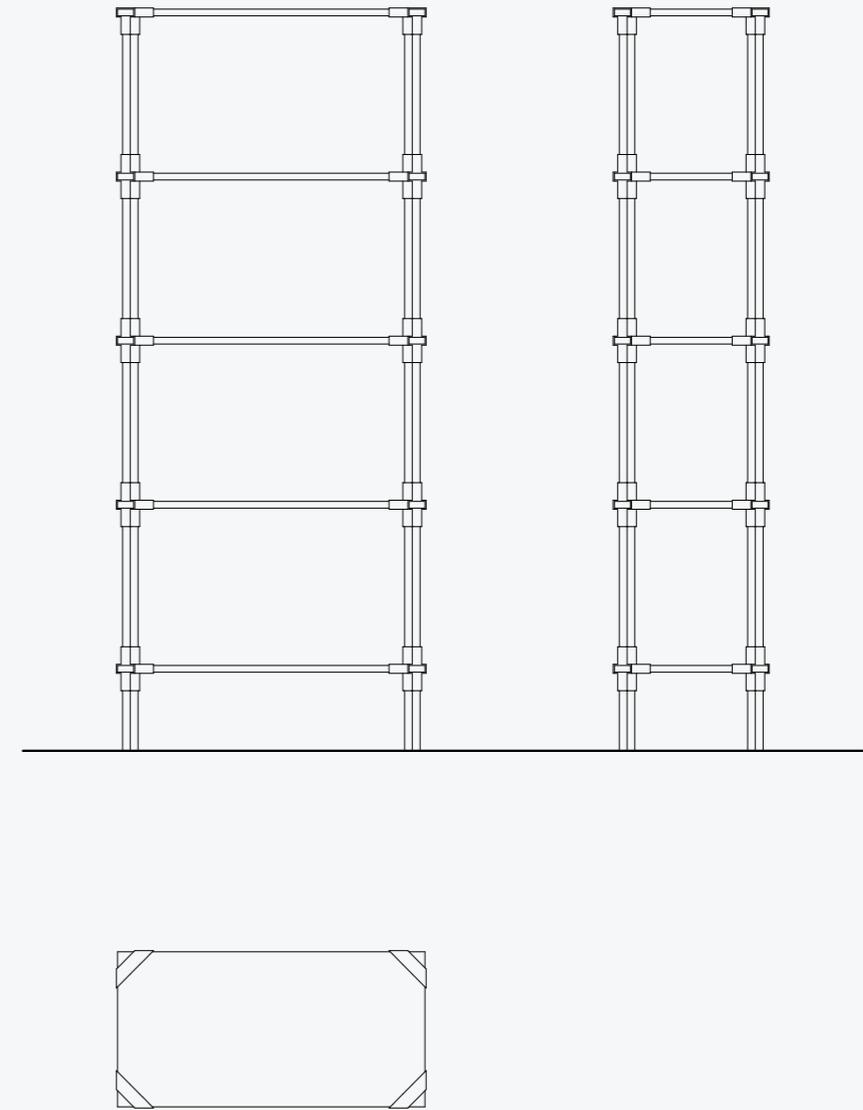


Figura 7.11 →
Proiezioni ortogonali della scaffalatura assemblata con il Giunto A.

Figura 7.10 ↓
Viste quotate dei piani e delle aste che compongono la scaffalatura.



L'assunzione dei carichi ai quali l'ipotetica scaffalatura costituita dal Giunto A deve resistere è stata stimata ipotizzando di collocare un carico distribuito di 8 portadocumenti pieni, spessi ciascuno 9 cm circa e con una massa variabile tra i 3 Kg e i 4 Kg. Il carico complessivo si aggirerebbe quindi sui 30 Kg per ripiano, valore pienamente in linea con le dichiarazioni di capacità di carico di una delle scaffalature più diffuse al mondo, lo scaffale "Billy" di IKEA. Dalle dichiarazioni dell'azienda svedese infatti, si evince che le capacità di carico per ripiano oscillano tra i 14 Kg e i 42 Kg a seconda della versione e delle dimensioni. Tuttavia, per valutare la resistenza della struttura in una condizione più difficile, si è scelto di considerare un carico di 30 Kg concentrato nel punto di mezzzeria⁹⁷ del ripiano. L'obiettivo di questa analisi sarà quella di verificare la resistenza del giunto nei suoi due punti più critici (Figura 7.12).

⁹⁷. È una linea immaginaria che divide esattamente a metà un oggetto.

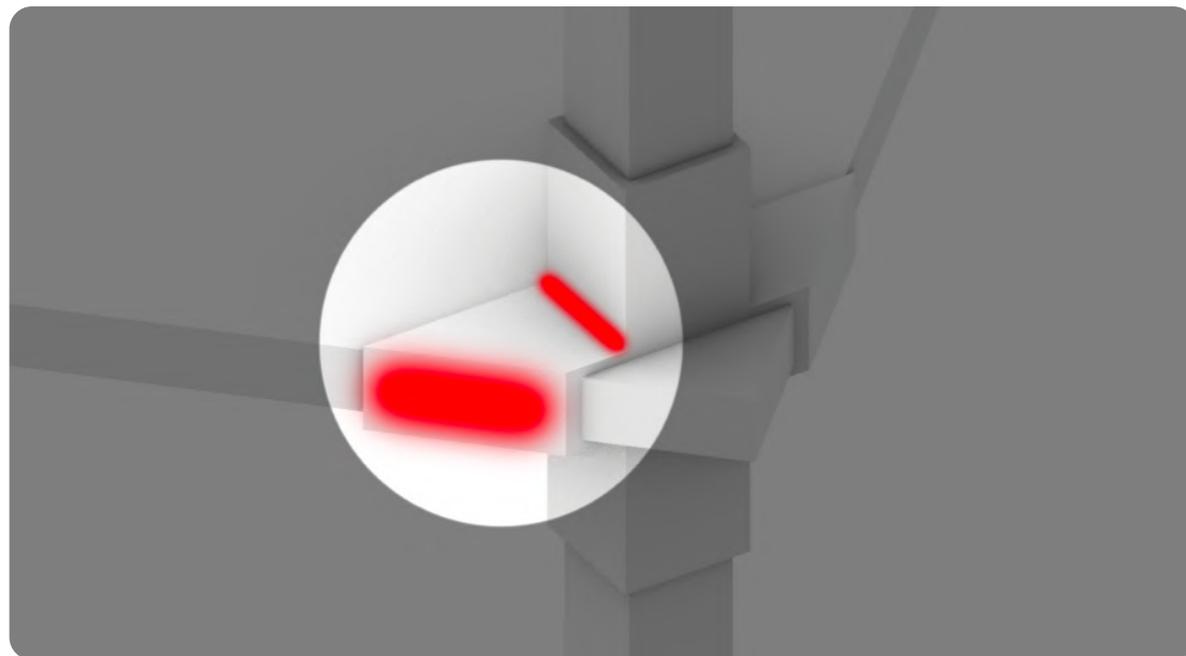


Figura 7.12
 Dettaglio del giunto e dei suoi due punti più sollecitati (mostrati in rosso).

Proprietà meccaniche dei materiali

Per poter proseguire con la verifica strutturale è stato necessario ricavare le proprietà dei materiali che sono stati utilizzati. Di seguito sono quindi riportate le proprietà meccaniche del legno di abete di cui sono costituiti i piani e le aste della scaffalatura. La prima abella (Tabella 7.4) mostra le proprietà del legno lungo la direzione delle fibre, mentre la seconda lungo la direzione trasversale rispetto alle fibre⁹⁸ (Tabella 7.5).

⁹⁸. Come spiegato precedentemente, la presenza di fibre e venature in un materiale causa anisotropia, per questo motivo le proprietà meccaniche variano di molto in base alla direzione in cui vengono applicate.

↓ **Tabella 7.4**
 Tabella delle proprietà meccaniche del legno di abete lungo la direzione longitudinale, dati CES EduPack 2019.

↓↓ **Tabella 7.5**
 Tabella delle proprietà meccaniche del legno di abete lungo la direzione trasversale, dati CES EduPack 2019.

Proprietà meccaniche Abete (direzione longitudinale)

Modulo Elastico	14,3 - 17,4 GPa
Limite di snervamento	42,7 - 52,2 MPa
Carico di rottura	70,2 - 85,8 MPa

Proprietà meccaniche Abete (direzione trasversale)

Modulo Elastico	0,8 - 0,89 GPa
Limite di snervamento	1,5 - 1,88 MPa
Carico di rottura	2,5 - 3,1 MPa

Per quanto riguarda il giunto invece, la Tabella 7.6 riporta le proprietà meccaniche del PLA, materiale con cui è stato realizzato tramite manifattura additiva.

Proprietà meccaniche PLA

Modulo Elastico	3,3 - 3,6 GPa
Limite di snervamento	55 - 72 MPa
Carico di rottura	83 - 108 MPa

Tabella 7.6
Tabella delle proprietà meccaniche del legno di abete lungo la direzione longitudinale, dati CES EduPack 2019.

I calcoli

Dal punto di vista strutturale ogni ripiano dello scaffale è assimilabile a un telaio incastrato agli estremi e con carico concentrato sulla parte orizzontale, come rappresentato nello schema riportato (Figura 7.13).

Figura 7.13
Schema che illustra una condizione di telaio incastrato agli estremi e con carico concentrato sulla parte orizzontale [203].

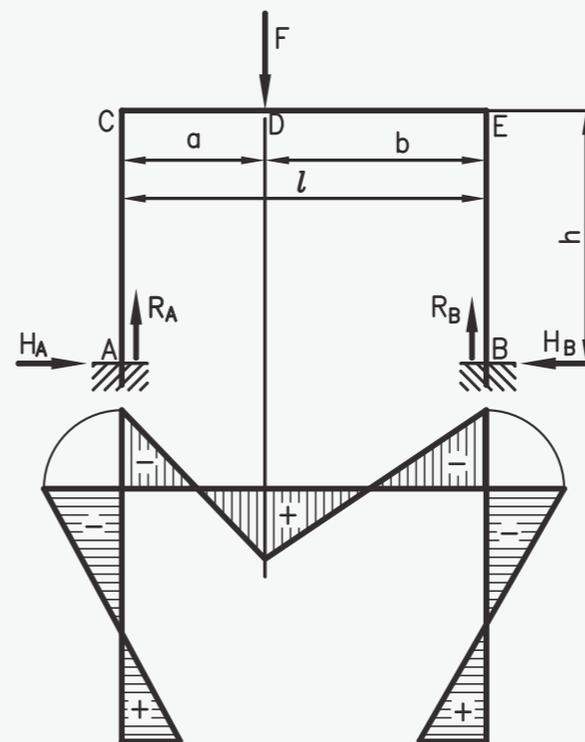
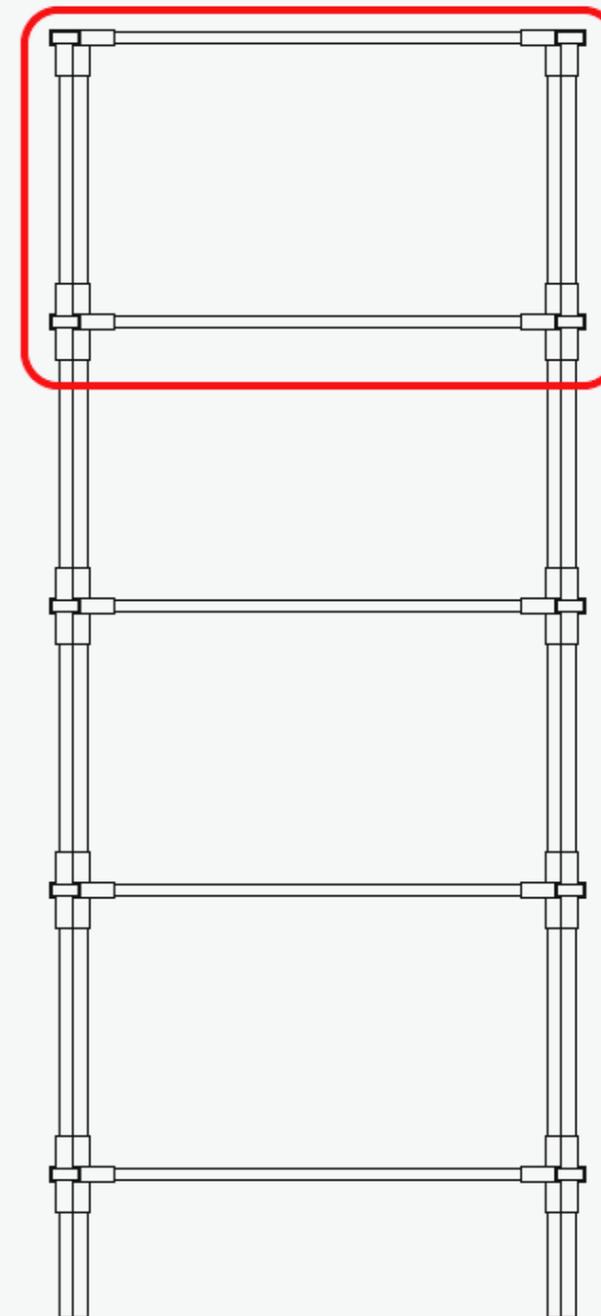


Figura 7.14
Rappresentazione della parte della struttura presa in considerazione per i calcoli.



Avendo i dati della lunghezza delle aste in legno $h = 400$ mm, la lunghezza del piano $l = 800$ mm, l'entità del carico $F = 300$ N e la sua posizione $a = 400$ mm, si è proceduto con il calcolo delle reazioni vincolari⁹⁹ e dei momenti¹⁰⁰ generati dalla forza applicata sul primo ripiano a partire dall'alto, utilizzando le formule indicate nella Figura 7.15.

Per la verifica strutturale del giunto si considera il momento flettente massimo¹⁰¹, che corrisponde al momento nei punti G e H (Figura 7.16):

MA1 = MB1 = -24000 Nmm
 MA = MB = 12000 Nmm
 MC = MD = 22000 Nmm
 ME = MF = 30600 Nmm
 MG = MH = 38100 Nmm

Il momento massimo (MG e MH) occorre poi dividerlo per due, per considerare anche il giunto collocato sul lato posteriore dei punti G e H¹⁰². Otteniamo quindi $MG/2 = MH/2 = 19050$ Nmm.

Lo stesso ragionamento vale per le reazioni vincolari che agiscono in due diverse direzioni.

Direzione verticale:
 RA = RB = 150 N
 RC = RD = 300 N
 RE = RF = 450 N
 RG = RH = 600 N
 Otteniamo $RG/2 = RH/2 = 300$ N

Direzione orizzontale:
 HA = HB = 90 N
 HC = HD = 90 N
 HE = HF = 90 N
 HG = HH = 90 N
 Otteniamo $HG/2 = HH/2 = 45$ N

99. È la forza esercitata da un vincolo su un corpo per impedirne il movimento.

100. È una grandezza fisica che misura la tendenza di una forza a far ruotare un oggetto attorno a un punto o a un asse.

101. È il valore massimo del momento che si sviluppa in una trave soggetta a carichi esterni.

102. Anche se la rappresentazione sulla quale si stanno svolgendo i calcoli è bidimensionale, bisogna tener conto del fatto che la struttura è tridimensionale e perciò si sviluppa in profondità.

$$R_A = \frac{F \cdot b}{l} \cdot \frac{6 \cdot h \cdot l + l^2 + a \cdot l - 2a^2}{6 \cdot h \cdot l + l^2}$$

$$R_B = \frac{F \cdot a}{l} \cdot \frac{6 \cdot h \cdot l + 3 \cdot a \cdot l - 2a^2}{6 \cdot h \cdot l + l^2}$$

$$H_A = H_B = \frac{3 \cdot F \cdot a \cdot b}{2 \cdot h \cdot l \cdot \left(\frac{h}{l} + 2\right)}$$

$$M_A = \frac{F \cdot a \cdot b}{2l} \cdot \frac{5 \cdot h \cdot l - l^2 + 2a \cdot (h + 2l)}{(h + 2l) \cdot (6h + l)}$$

$$M_B = \frac{F \cdot a \cdot b}{2l} \cdot \frac{3l + 7 \cdot h \cdot l - 2a \cdot (h + 2l)}{(h + 2l) \cdot (6h + l)}$$

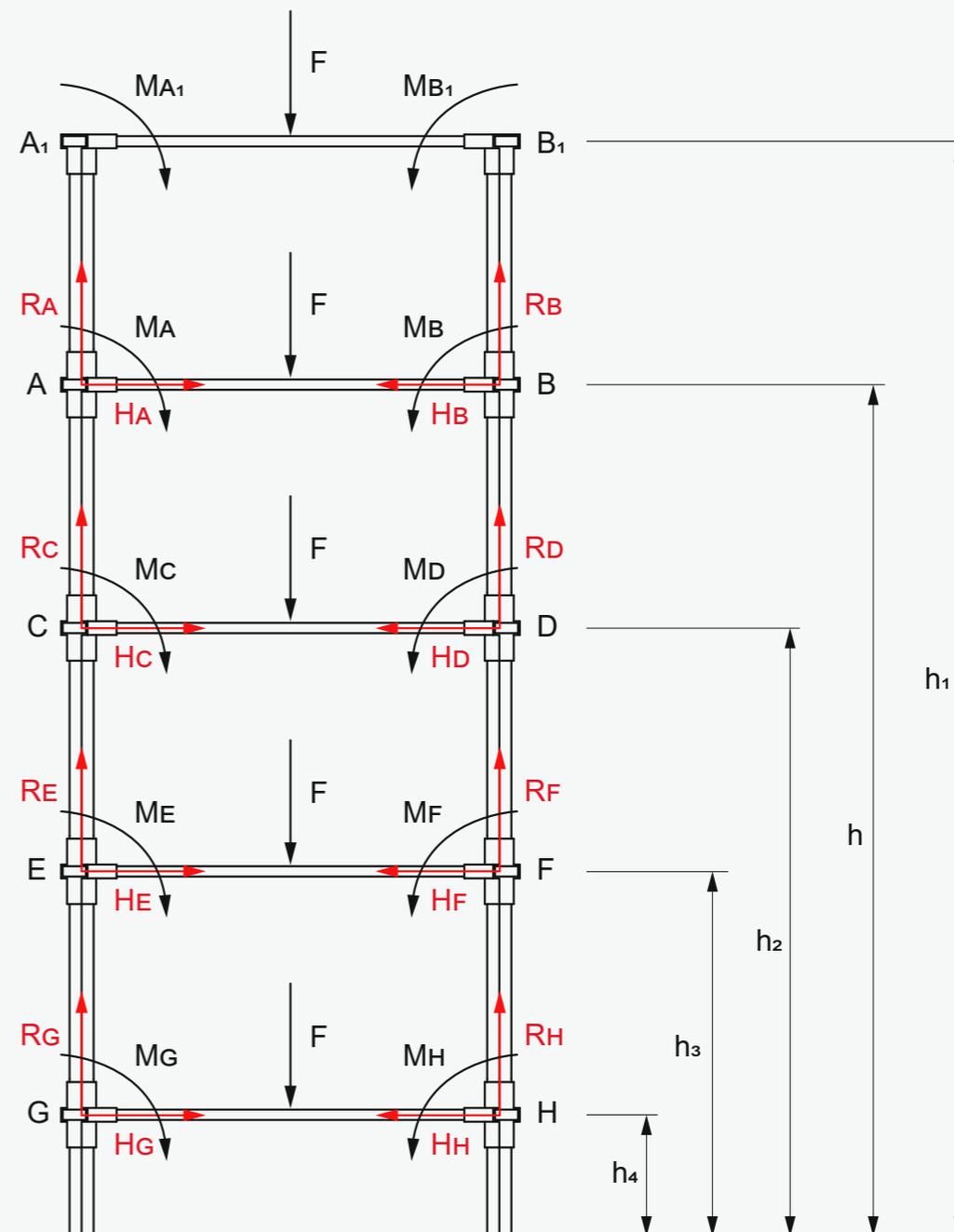
$$M_C = M_A - H_A \cdot h$$

$$M_E = M_B - H_B \cdot h$$

$$M_D = M_A - H_A \cdot h + R_A \cdot a$$

Figura 7.15 ↑
 Formule per il calcolo delle reazioni vincolari e dei momenti generati dalla forza applicata [203].

Figura 7.16 →
 Rappresentazione di tutte le sollecitazioni, reazioni vincolari e momenti che avvengono in seguito all'applicazione di un carico.



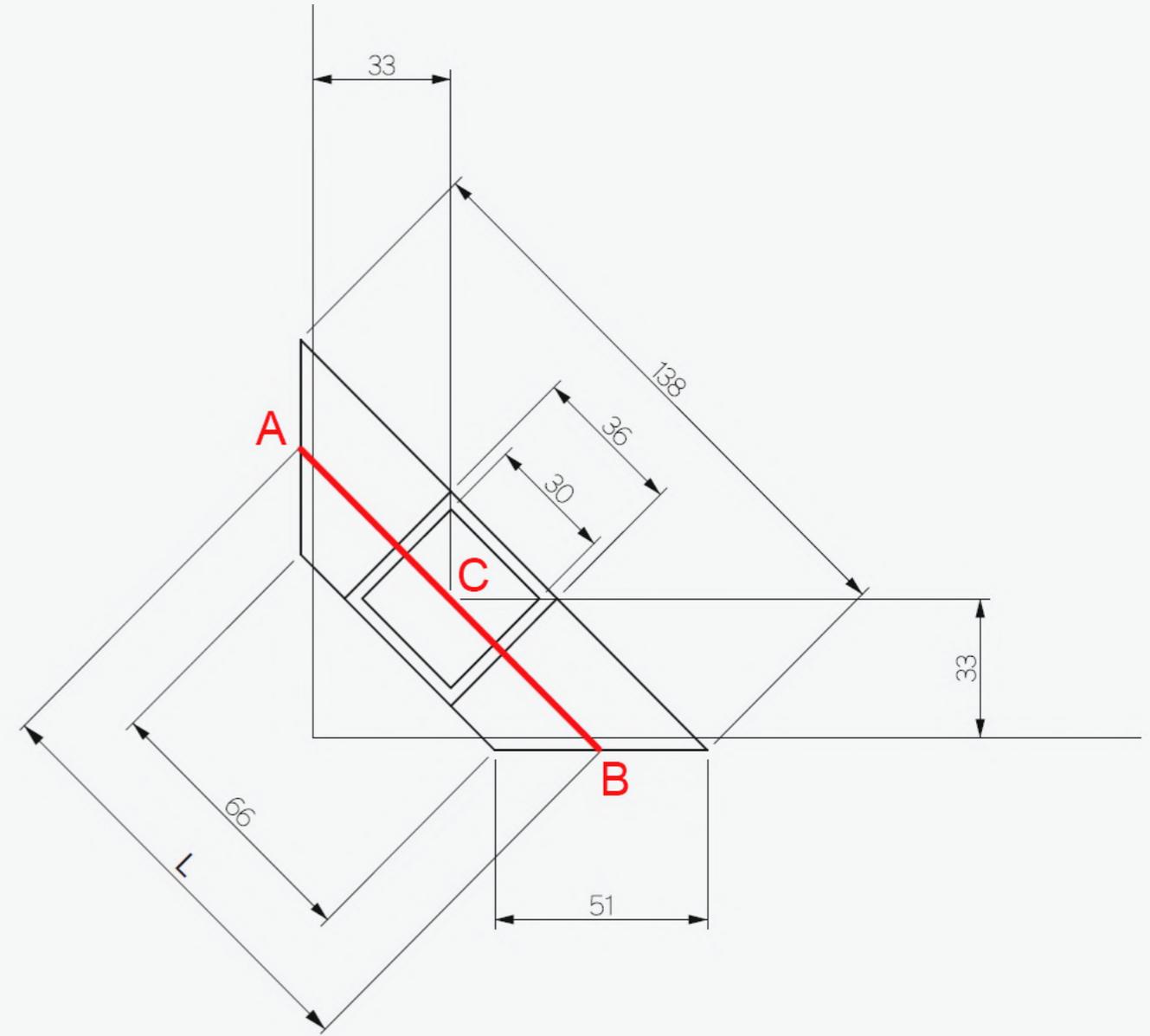
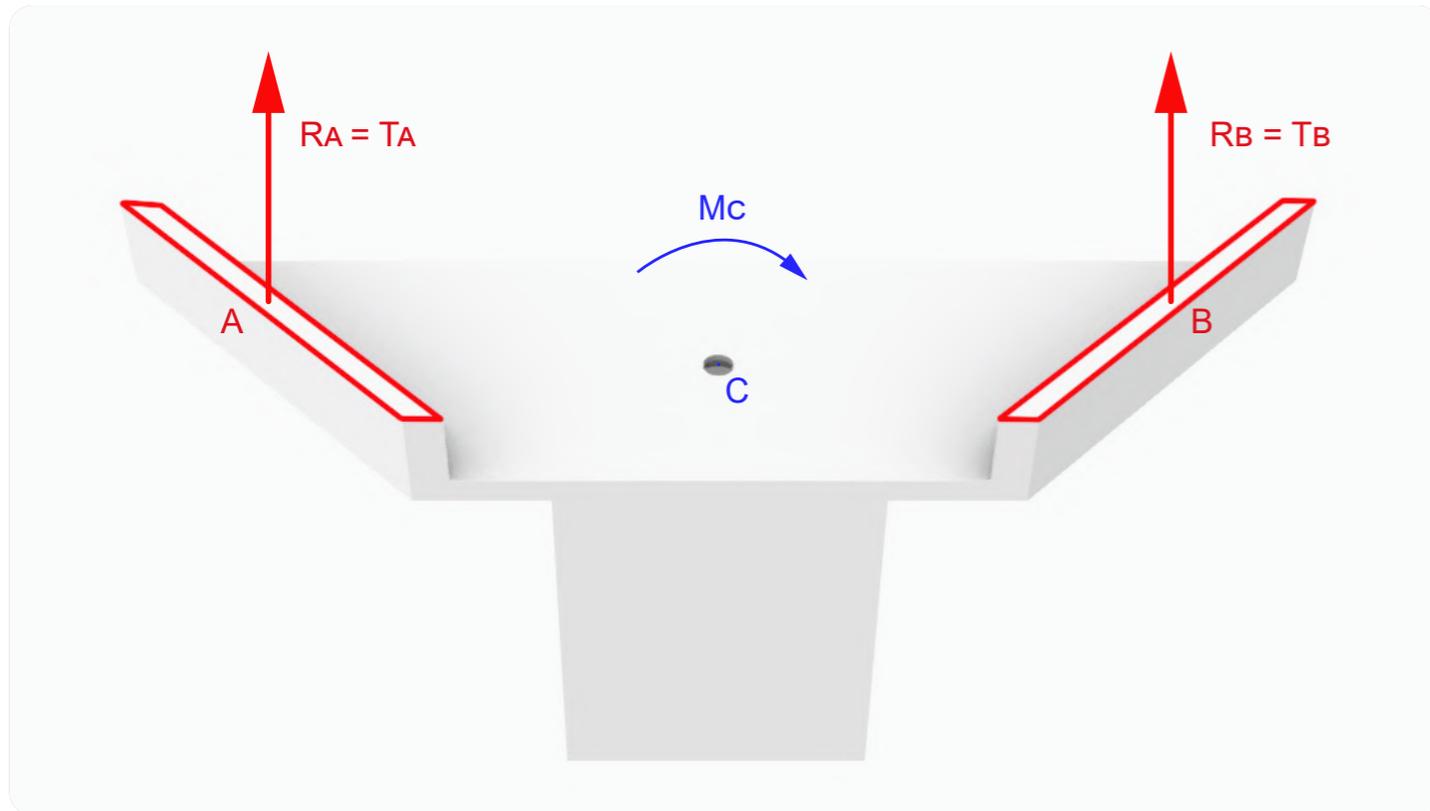
Verifica della resistenza delle pareti esterne del giunto

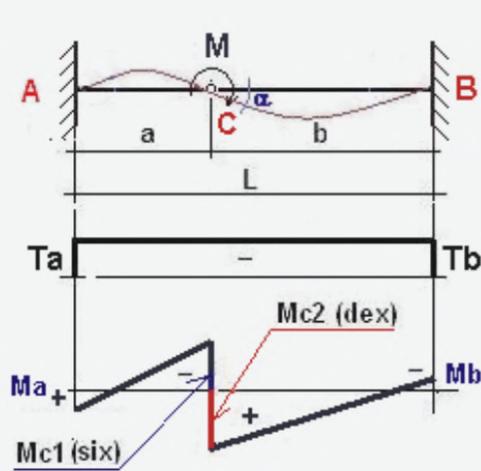
Le sezioni del giunto (evidenziate nella Figura 7.17) sono sollecitate alla flessione e al taglio¹⁰³ dovuti al carico applicato sul ripiano. Si è notato tuttavia che la sezione in questione deve anche resistere ad una sollecitazione di trazione provocata dall'accoppiamento per interferenza tra il piano e la parte del giunto che lo accoglie, andandolo a tutti gli effetti "pinzare". La sezione rappresentata dalla linea rossa (Figura 7.18) può essere schematizzata come una trave incastrata agli estremi e sollecitata da un momento nel punto C, come mostrato nella Figura 7.19 a pagina 236.

103. È una sollecitazione in cui due forze opposte agiscono parallelamente ma in direzioni opposte su un materiale.

Figura 7.18 →
Sezione considerata come una trave incastrata agli estremi e sollecitata da un momento nel punto C.

Figura 7.17 ↓
Dettaglio di una delle sezioni del giunto più sollecitate (evidenziata in rosso).





$$R_a = -\frac{6M}{L^3} a b$$

$$R_b = -R_a$$

$$T_a = T_b = R_a$$

$$M_a = \frac{M b}{L} (2 - 3 b/L)$$

$$M_b = -\frac{M a}{L} (2 - 3 a/L)$$

$$M_{c1} = M_a + T_a a$$

$$M_{c2} = M_{c1} + M$$

$$f_c = \frac{M a^2 b^2 (a - b)}{2 L^3 E J}$$

freccia f_x nel tratto A - C

$$f_{x(A-C)} = \frac{M b x^2}{2 L E J} \left(2 a \frac{L-x}{L^2} - b/L \right)$$

freccia f_x nel tratto C - B

$$f_{x(C-B)} = \frac{M a (L-x)^2}{2 L E J} \left(2 \frac{b x}{L^2} - a/L \right)$$

rotazione in C

$$\alpha_c^\circ = \frac{M a b}{E J L} \left(1 - 3 \frac{a b}{L^2} \right) \frac{180}{\pi} \text{ (gradi)}$$

Figura 7.19
Formule per il calcolo della trave incastrata agli estremi e sollecitata da un momento applicato in un punto di una trave [204].

Infine, si calcola la sollecitazione di trazione uniassiale generata dall'incastro per interferenza del piano di legno nel giunto (Figura 7.20). Applicando la legge di Hooke¹⁰⁵ si calcola la tensione (σ) generata dall'interferenza, che risulta essere pari a 37,1 N/mm².

105. Legge che descrive il comportamento elastico dei materiali. Si esprime con la formula $\sigma = E \cdot \epsilon$

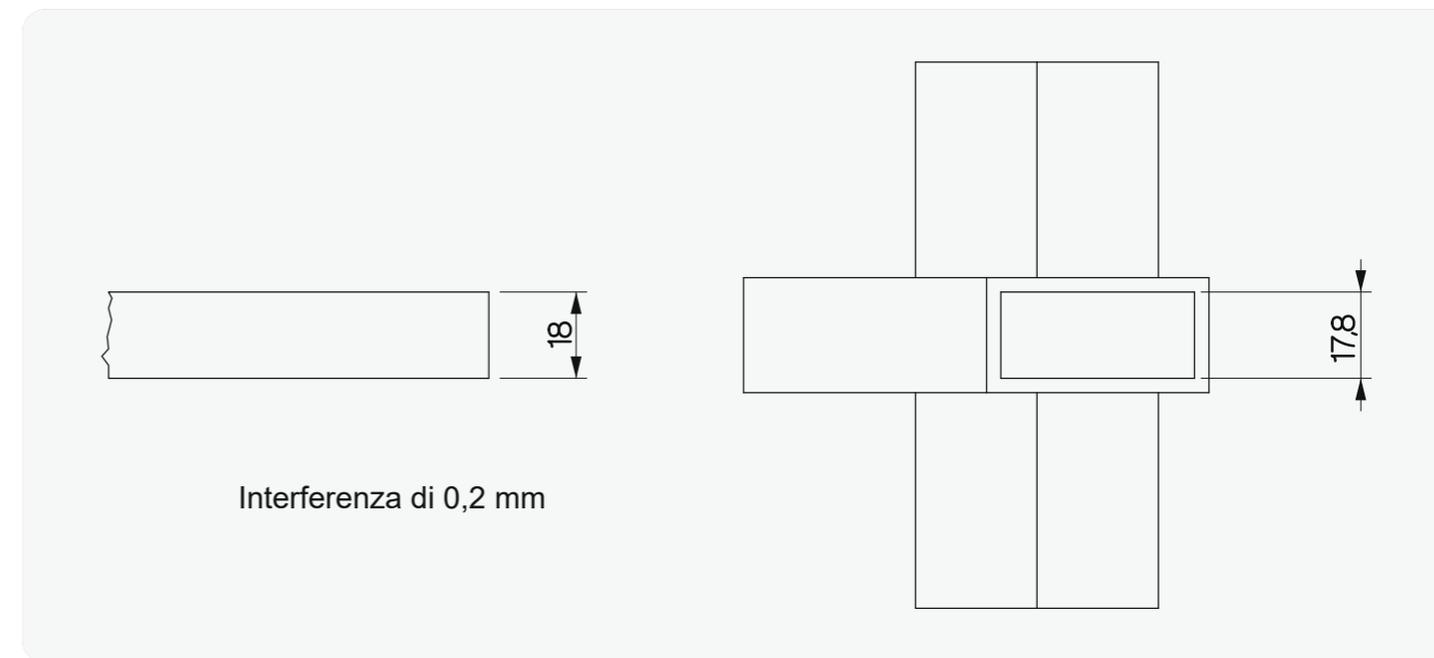


Figura 7.20
Rappresentazione dell'interferenza tra il piano (a sinistra) e il giunto (a destra).

Il momento che sollecita la trave nel punto C è rappresentato dal momento M del giunto che viene maggiormente sollecitato [205], che corrisponde a $MG/2 = 19050$ Nmm, già calcolato precedentemente.

A questo punto, si procede con il calcolo delle reazioni vincolari e del momento flettente massimo e, calcolando il modulo di resistenza a flessione della sezione resi-

stente¹⁰⁴, è possibile calcolare la flessione (σ) alla quale deve resistere il materiale. Il medesimo ragionamento viene applicato alla sollecitazione di taglio (τ) che viene generata dalla forza RA sulla sezione.

Applicando infine la formula per combinare le sollecitazioni di flessione (σ) con quelle di taglio (τ) (formula di Von Mises) si ottiene una σ ideale pari a 7,5 N/mm².

104. Capacità di una sezione trasversale di un elemento strutturale di resistere alle sollecitazioni di flessione.

Per concludere la verifica di questa sezione della parete del giunto bisogna calcolare la sollecitazione (σ) complessiva, che comprende: la sollecitazione a flessione, quella di taglio e quella a trazione. La sollecitazione complessiva risulta essere di 44,6 N/mm² e, poiché è inferiore rispetto al carico di snervamento del PLA, pari a 55 N/mm², la sezione della parete del giunto resiste.

Verifica della resistenza del punto di giunzione del giunto con il montante

Nella Figura 7.21 è mostrata la sezione resistente alla sollecitazione del momento e del taglio. Conoscendo già l'entità del momento M nel punto C e del braccio b (Figura 7.22), si calcola la forza di taglio.

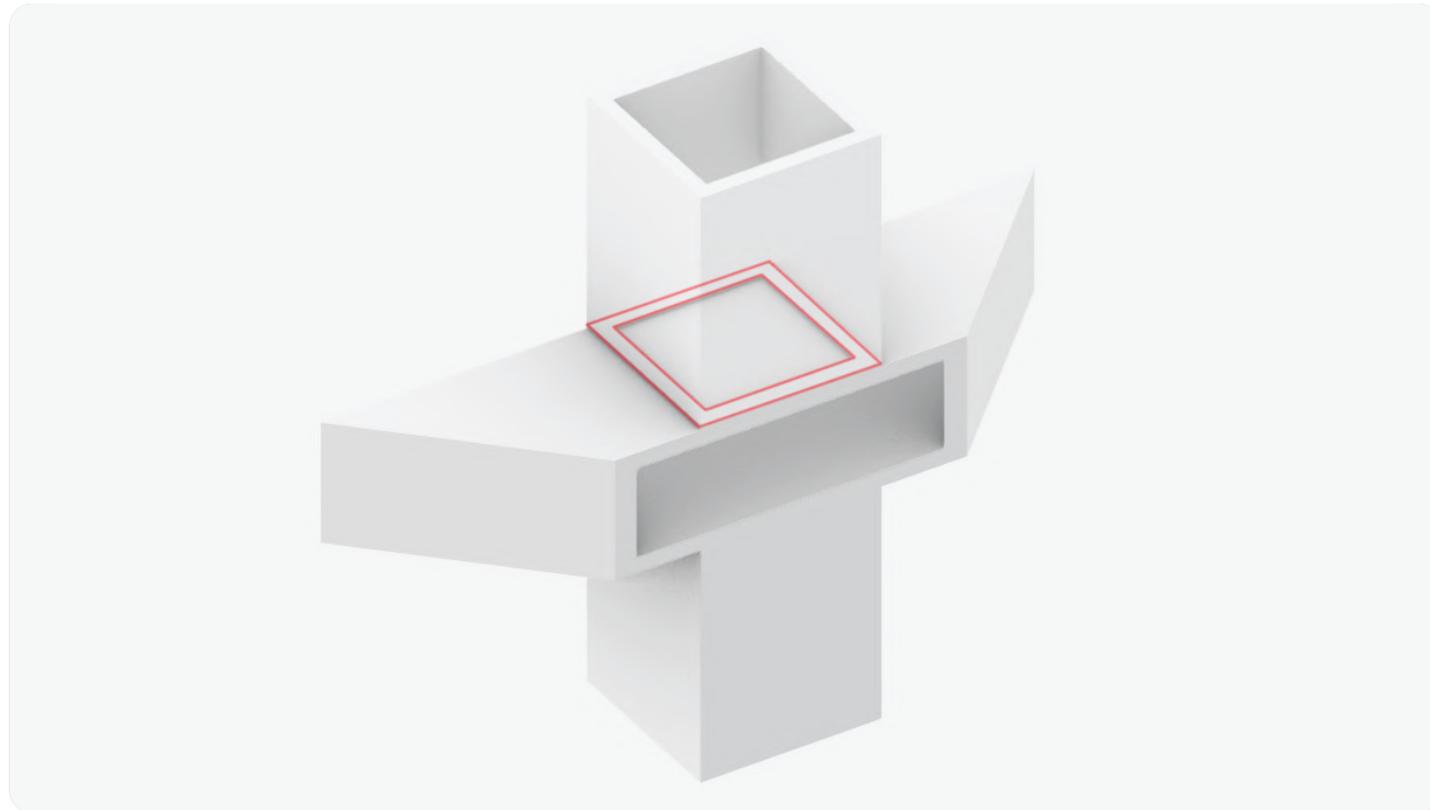


Figura 7.21
Dettaglio di una delle sezioni del giunto più sollecitate (evidenziata in rosso).

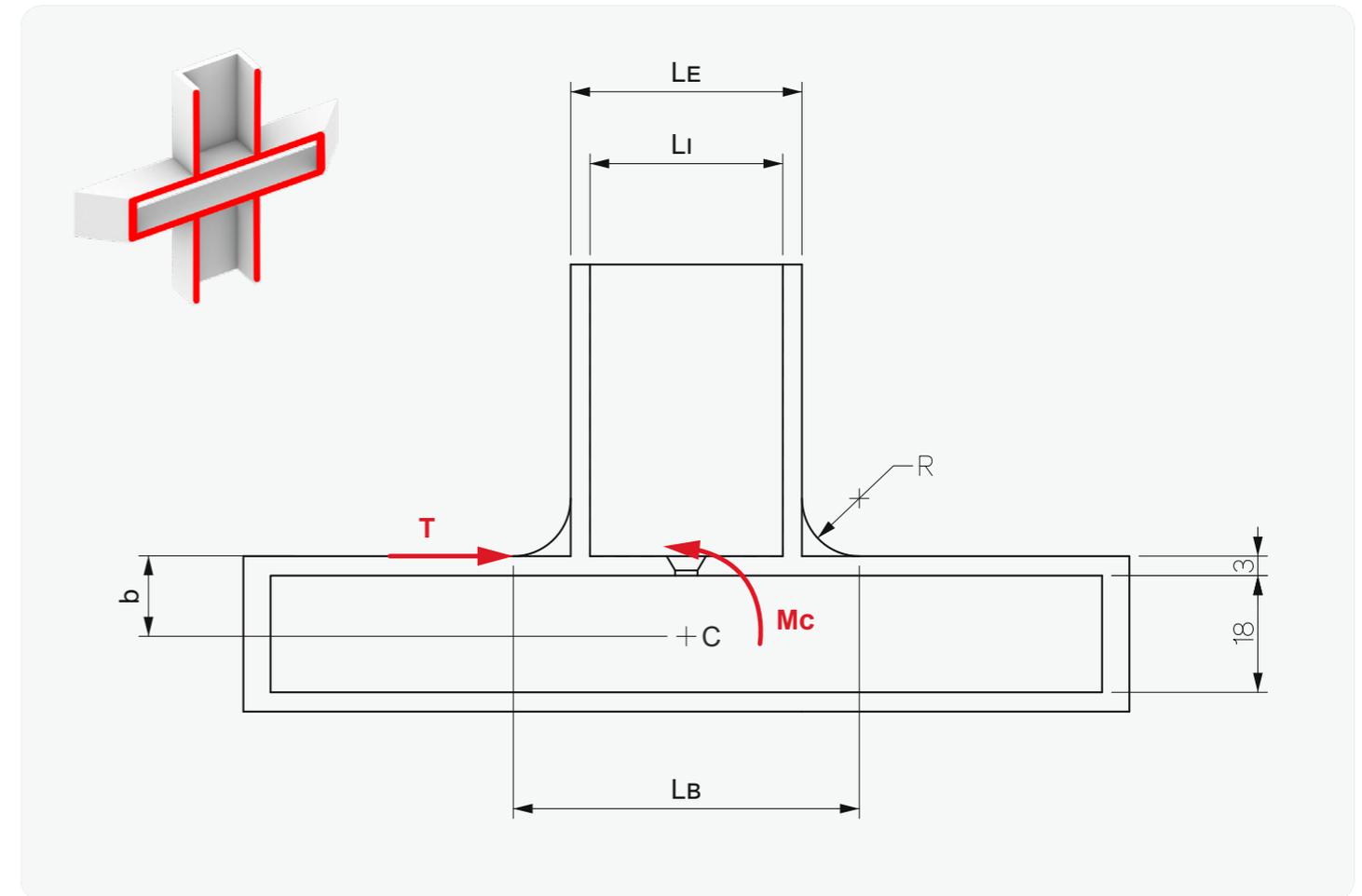


Figura 7.22
Rappresentazione che mostra come il momento e la forza di taglio agiscono su questa sezione.

Come già fatto in precedenza si calcolano le sollecitazioni di flessione (σ) e di taglio (τ), per poi calcolare la σ ideale, che risulta essere pari a 15 N/mm^2 , inferiore del carico di snervamento del PLA: la sezione dunque resiste.

Infine si è voluto considerare anche l'effetto intaglio¹⁰⁶, ovvero come la presenza di un raggio di curvatura r possa diminuire la concentrazione delle tensioni. Il coefficiente K_t rappresenta la tensione che si genera per l'effetto intaglio: più il raggio di curvatura è piccolo, più la tensione che si genera nello spigolo è alta [205]. Il coefficiente K_t va moltiplicato per la sollecitazione σ , ed è un valore che aumenta esponenzialmente al diminuire del raggio di curvatura del raccordo (Figura 7.23). Di conseguenza, più il raggio di curvatura del raccordo è basso, più la sollecitazione è alta. Quindi, considerando un $r = 2$ mm e moltiplicando il coefficiente K_t , otte-

nuto tramite il rapporto r/d (diametro minore) e il rapporto d/D (diametro maggiore), con la tensione σ ideale dovuta al taglio e alla flessione, calcolata precedentemente e pari a 15 N/mm², si ottiene un aumento di quest'ultima di 1,8 (valore del coefficiente K_t), con una σ ideale finale pari a 27 N/mm². Infine si confronta questo valore con il carico di snervamento del materiale del giunto. Il risultato di questa verifica è che il raggio di curvatura per un giunto con questo spessore di sezione non deve essere inferiore ai 2 mm, in quanto, con tale raggio, la sollecitazione σ ideale complessiva risulta essere inferiore rispetto al carico di snervamento del PLA.

106. Fenomeno per cui una concentrazione di tensione si verifica in corrispondenza di una discontinuità geometrica come uno spigolo vivo.

Verifica della resistenza del piano di legno

Come ultima verifica si è ritenuto opportuno valutare la resistenza del singolo piano di legno, sia nella direzione longitudinale che nella direzione trasversale rispetto all'orientamento delle sue fibre. A titolo esemplificativo è stato illustrato unicamente il processo per la direzione longitudinale.

Si considerano:
 $F = 300$ N
 $L = 800$ mm
 $L1 = 400$ mm
 $L2 = 400$ mm
 Spessore del piano = 18 mm
 $\sigma_f = 77$ N/mm² (Carico di resistenza a flessione)

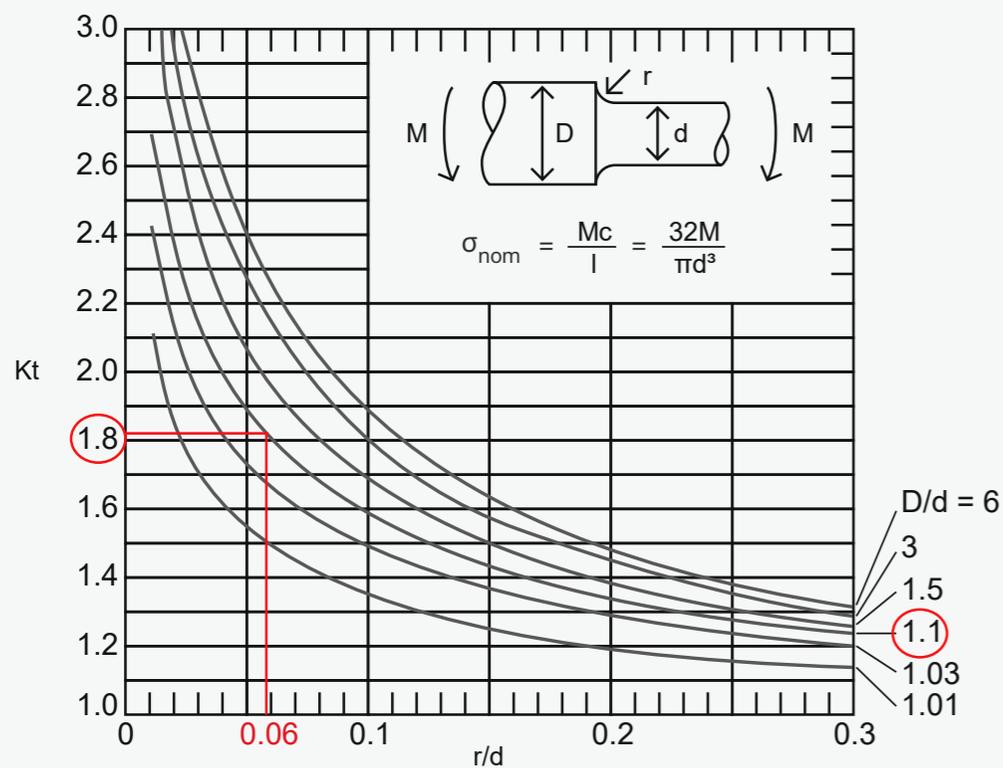


Figura 7.23
 Tabella per il calcolo del coefficiente K_t .

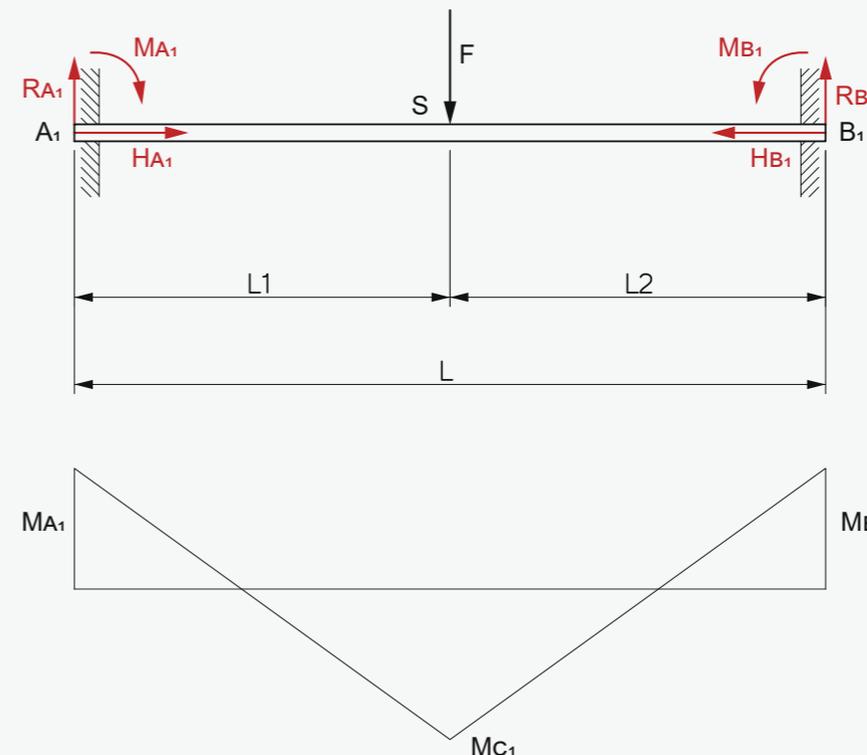


Figura 7.24
 Rappresentazione delle sollecitazioni che avvengono in seguito all'applicazione di un carico.

Calcolando le reazioni vincolari e i momenti è possibile verificare la resistenza della sezione del piano al massimo momento di flessione. Con un carico di F pari a 300 N l'esito della verifica è positivo. Allo stesso modo, è risultato positivo anche l'esito sulla direzione trasversale.

7.6 La progettazione generativa

Come già anticipato in precedenza, il fine della verifica strutturale effettuata manualmente, oltre a verificare la resistenza e l'affidabilità delle giunture, è di ottenere le sollecitazioni effettive alle quali il giunto è sottoposto, le quali verranno inserite come input e vincoli di progetto all'interno del software Fusion 360. In assenza di questo processo diventa infatti molto difficile stimare gli input da fornire al programma. Anche in questo caso verrà mostrato il processo di progettazione generativa delle giunture attraverso il Giunto A.

Tabella 7.7
Tabella riassuntiva del programma software CAD utilizzato per la progettazione generativa [8, 141].

Fusion 360



Software di progettazione e ingegnerizzazione di prodotti con funzionalità di progettazione generativa. Può generare diverse varianti di un singolo componente partendo dalle sollecitazioni a cui sarà sottoposto, così che ogni forma esplorata possa essere efficace e pronta per la produzione.

Mantenimento e Ostacoli

Una volta importato il modello CAD in Fusion 360 si procede con la selezione delle geometrie di mantenimento e delle geometrie di ostacolo.

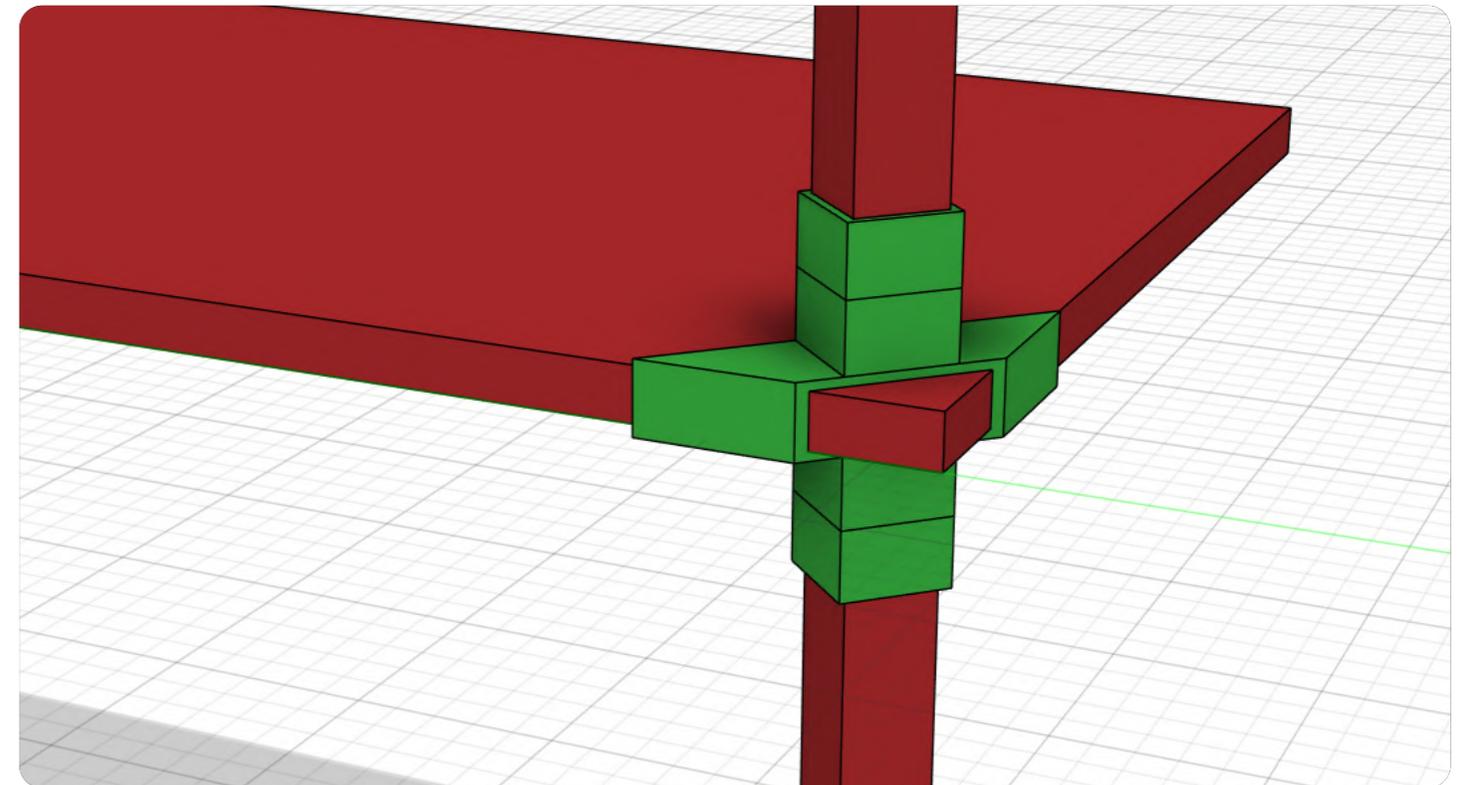
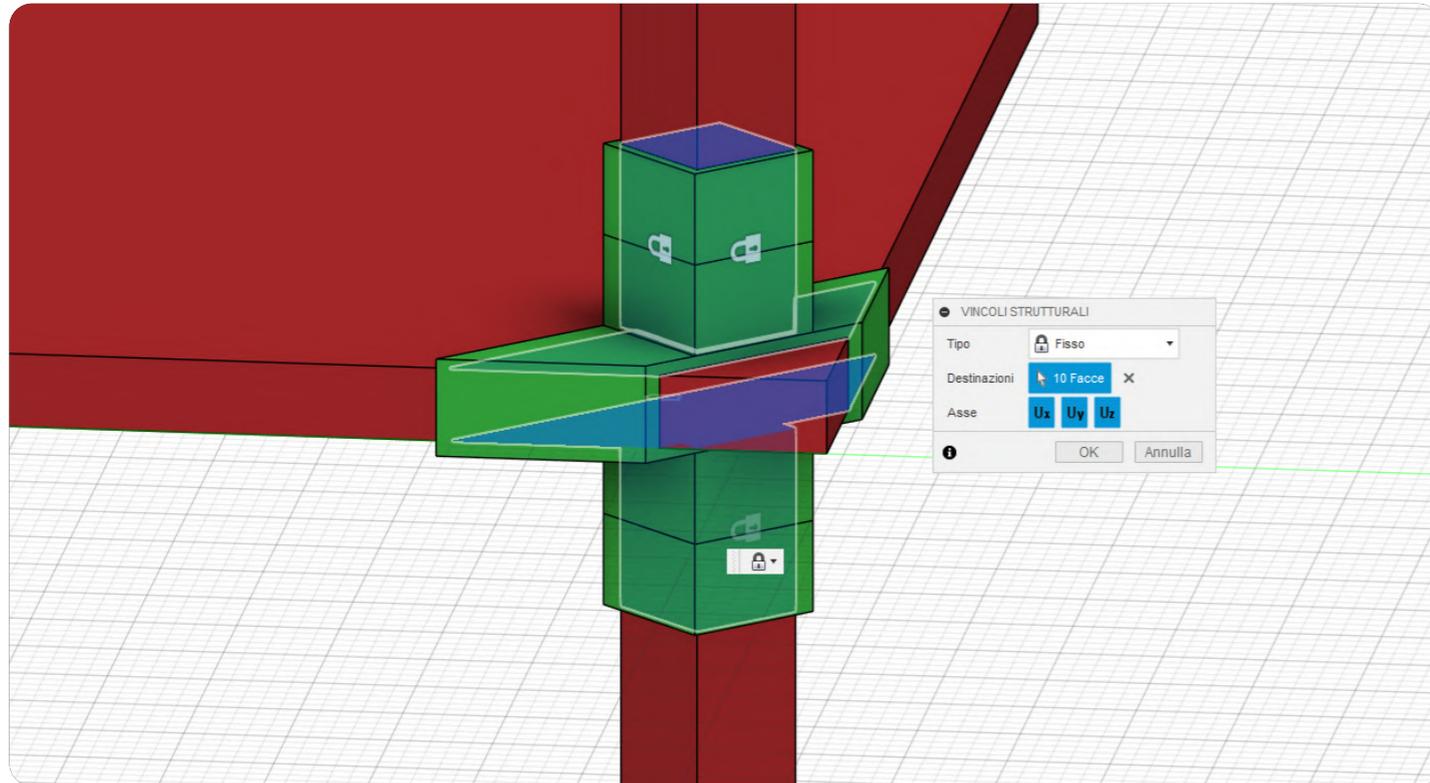


Figura 7.25
Modello di partenza con geometrie di mantenimento (in verde) e di ostacolo (in rosso).

Vincoli strutturali

Successivamente si procede con l'assegnazione dei vincoli, utili a definire in che modo la progettazione interagisce con gli oggetti non inclusi nel modello. In questo caso occorre segnalare al software che il giunto non si deve muovere rispetto al piano e alle aste.

Figura 7.26
Selezione dei vincoli strutturali.



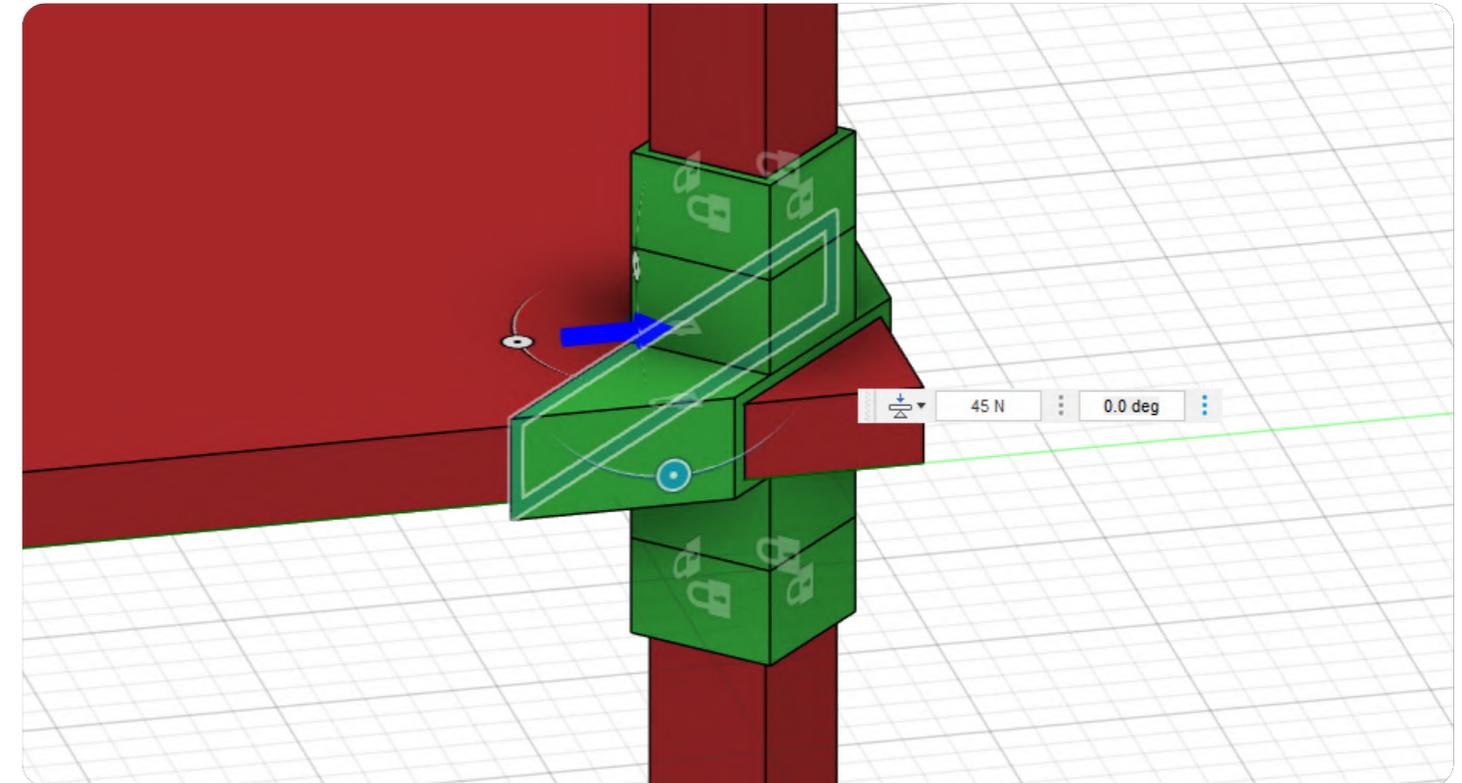
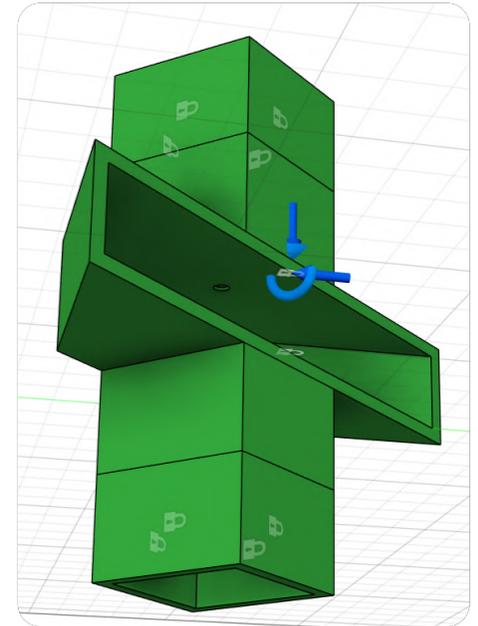
Carichi

Definiti i vincoli, occorre impostare i carichi, precedentemente calcolati, ai quali il giunto è sottoposto: momento flettente, reazione vincolare orizzontale e verticale. Il carico orizzontale (Figura 7.27) corrisponde alla massima reazione vincolare calcolata nella direzione orizzontale¹⁰⁷:
 $HA = HB = HC = HD = HE = HF = HG = HH = 90/2 = 45 \text{ N}$.

107. Come spiegato nel paragrafo 7.5, va diviso per due perché i calcoli sono stati effettuati su una rappresentazione bidimensionale, ma bisogna tener conto della profondità della struttura.

Figura 7.27 →
Rappresentazione riassuntiva dei carichi a cui il Giunto A è sottoposto.

Figura 7.28 ↓
Selezione del carico orizzontale che agisce sul giunto.



Analogamente anche il carico verticale da inserire in Fusion 360 corrisponde alla massima reazione vincolare calcolata per il giunto più sollecitato, ovvero $R_G = R_H = 600/2 = 300$ N.

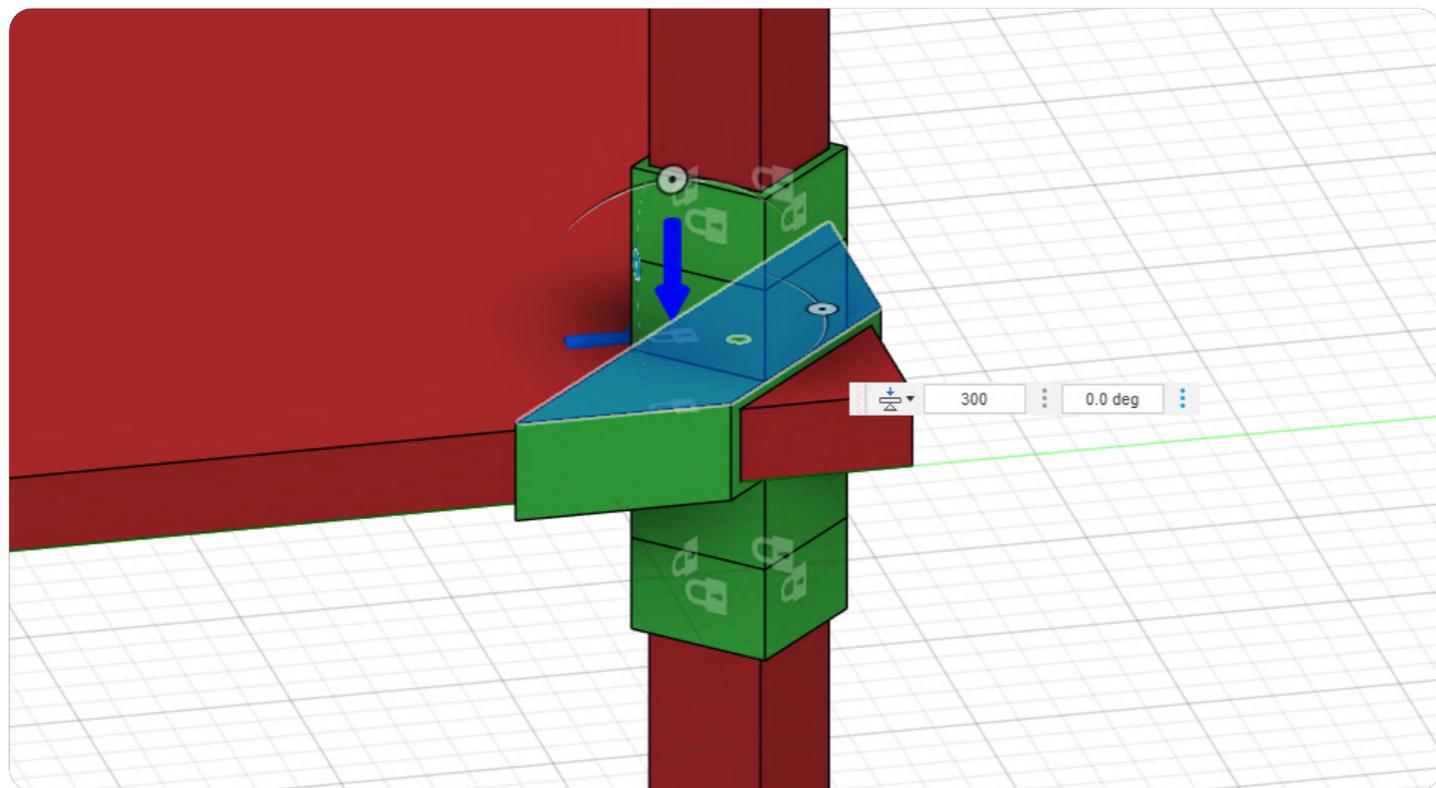


Figura 7.29
Selezione del carico verticale che agisce sul giunto.

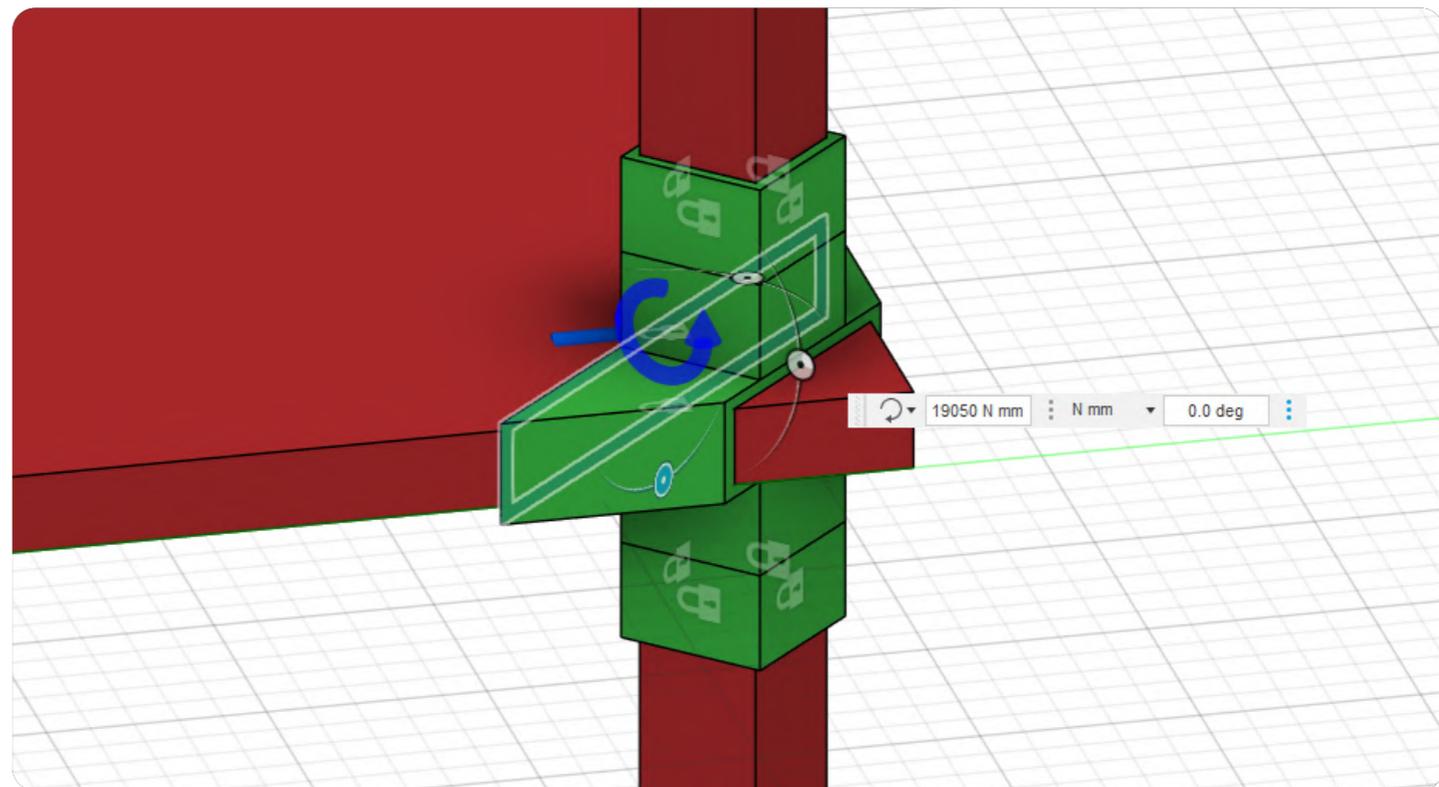


Figura 7.30
Fase di inserimento del momento flettente massimo.

Il discorso è analogo anche per il momento flettente. Nel programma si inserisce il momento flettente massimo tra quelli calcolati per i giunti collocati sui diversi ripiani. Come mostrato precedentemente, il momento risulta essere $M_G = M_H = 38100$ Nmm, che diviso per 2 è pari a 19050 Nmm (ovvero il massimo momento flettente a cui è sottoposto il singolo giunto più sollecitato dell'intera scaffalatura).

Obiettivi e tecnologia di produzione

Definizione degli obiettivi e dei limiti della progettazione (Figura 7.28) e della tecnologia di produzione (Figura 7.29).

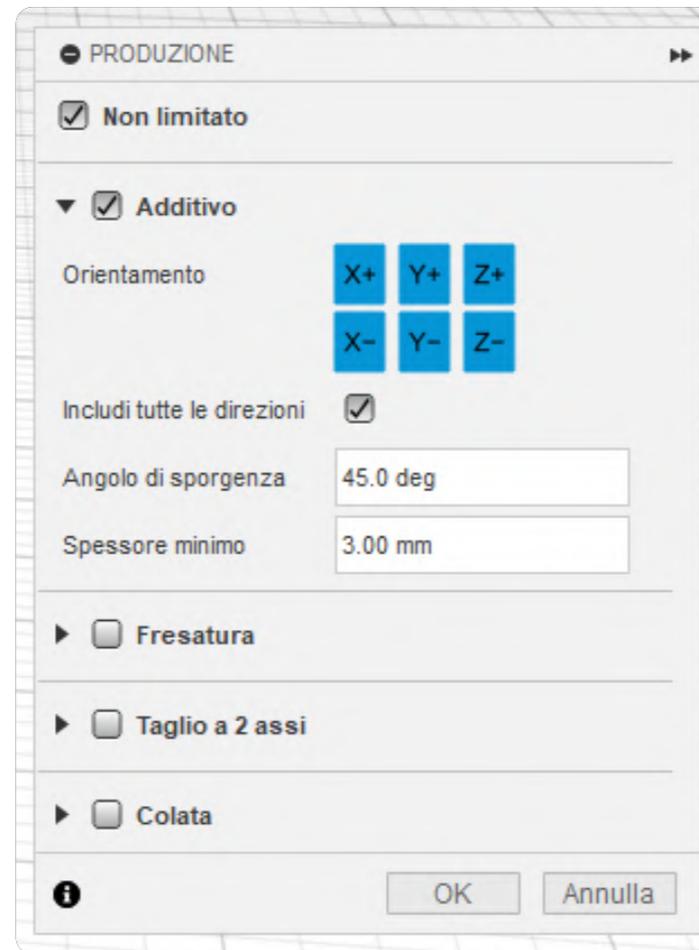
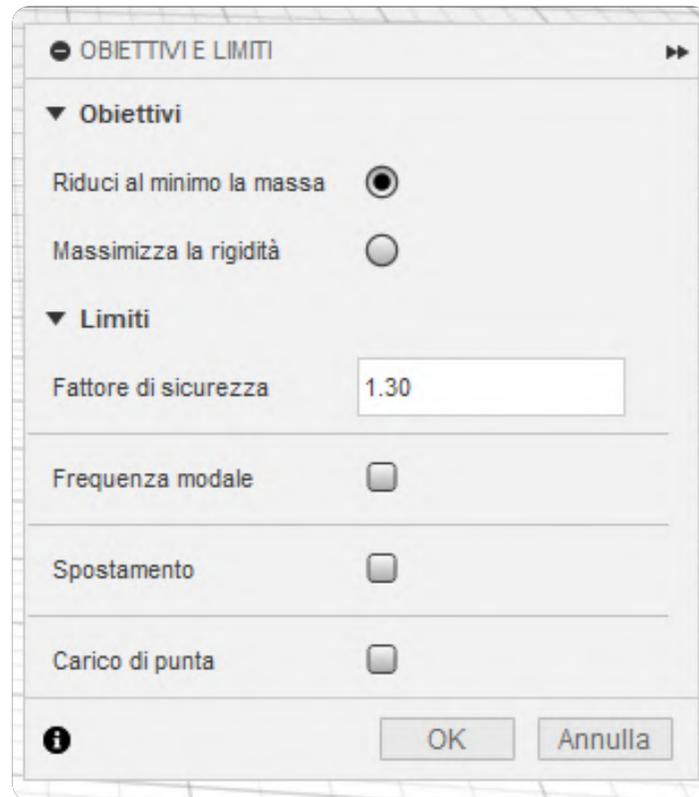


Figura 7.31 ↙
Selezione degli obiettivi di progettazione.

Figura 7.32 ↓
Selezione della tecnologia con cui verrà prodotto il giunto.

Materiali

Prima di procedere con la generazione occorre inoltre selezionare i materiali con i quali si vuole effettuare lo studio, nel nostro caso un polimero termoplastico per FDM.

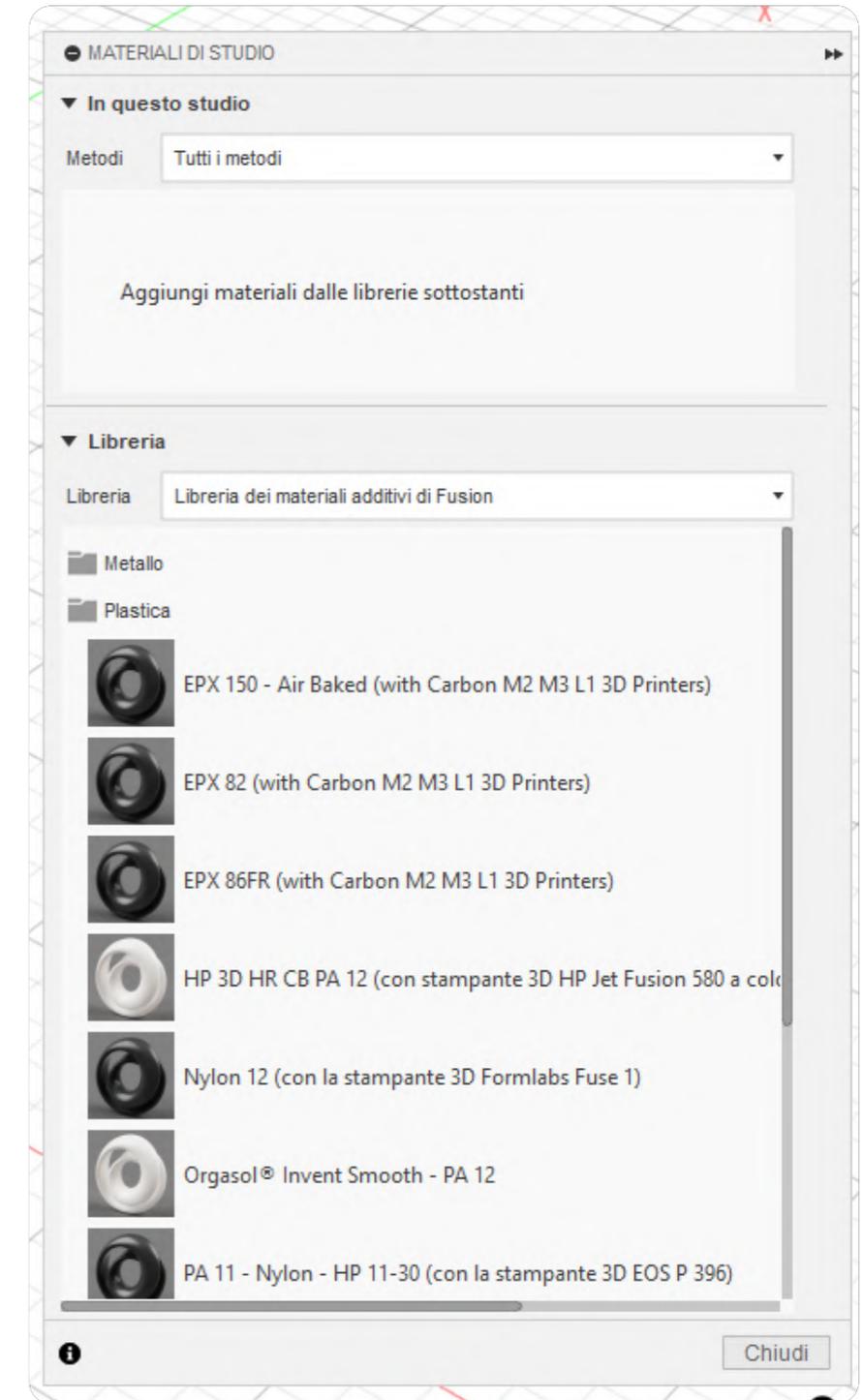


Figura 7.33
Selezione dei materiali di produzione con cui realizzare il giunto.

I risultati della generazione: Giunto A

Il software, una volta effettuata la generazione, propone i diversi modelli che rispondono alle prestazioni richieste di resistenza, ma differiscono per geometria dei rinforzi o spessori delle pareti, da cui la variazione della massa e del consumo di materiale.

Alcune forme acquistano una stravaganza formale eccessiva e pertanto vengono scartate, mentre altre, come nel caso del risultato 2 (evidenziato in arancione), diventano un riferimento espressivo, a sua volta oggetto di rielaborazione da parte del progettista.

Risultato 1



Massa	175g
Spessore pareti	7,5 mm
Obiettivo impostato	Massimizzare la rigidezza
Stile espressivo	Organico
Considerazioni	Forma interessante ma consumo materico eccessivo
Costo stimato	4,10 €

Risultato 2



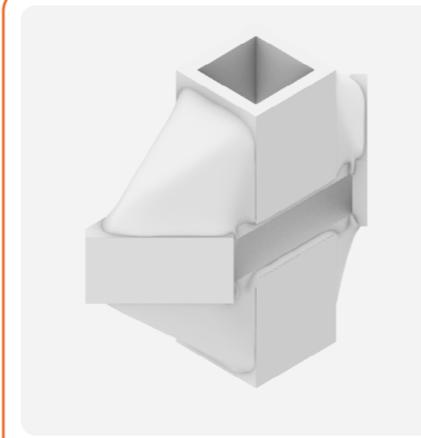
Massa	133g
Spessore pareti	3,5 mm
Obiettivo impostato	Minimizzare la massa
Stile espressivo	Organico
Considerazioni	Interessante dal punto di vista formale e aggiunta di materiale moderata
Costo stimato	3,27 €

Risultato 3



Massa	163g
Spessore pareti	5 mm
Obiettivo impostato	Minimizzare la massa
Stile espressivo	Organico
Considerazioni	Forma non convincente
Costo stimato	3,78 €

Risultato 4



Massa	258g
Spessore pareti	4 mm
Obiettivo impostato	Massimizzare la rigidezza
Stile espressivo	Organico-geometrico
Considerazioni	Consumo materico eccessivo e forma pesante visivamente
Costo stimato	5,76 €

Risultato 5



Massa	173g
Spessore pareti	3,5 mm
Obiettivo impostato	Massimizzare la rigidezza
Stile espressivo	Organico-geometrico
Considerazioni	Simile al risultato 2, ma con consumo materico maggiore
Costo stimato	4,14 €

Risultato 6

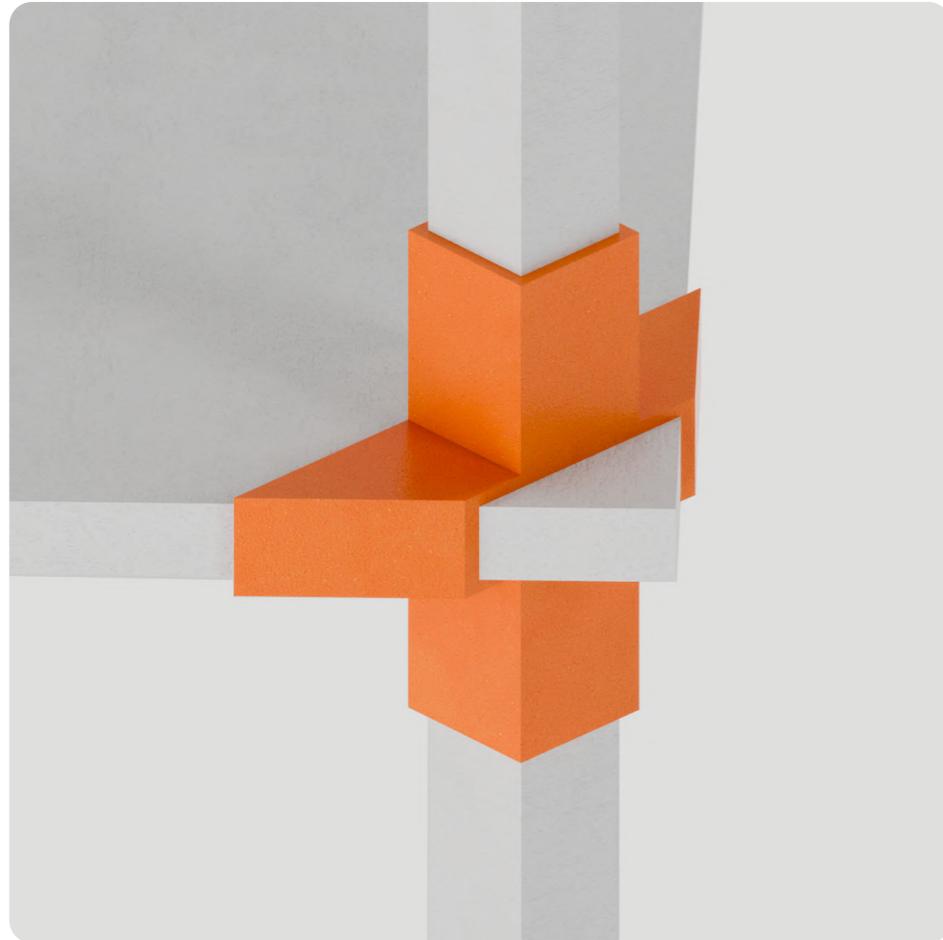


Massa	140g
Spessore pareti	3,5 mm
Obiettivo impostato	Minimizzare la massa
Stile espressivo	Organico-geometrico
Considerazioni	Simile al risultato 2, ma meno interessante per lo stile misto
Costo stimato	3,53 €

I risultati della rielaborazione: Giunto A

In questa fase sono stati rielaborati i risultati generati da Fusion 360 per ottenere varianti che offrissentro le caratteristiche meccaniche richieste, ma anche associate ad un diverso linguaggio iconico espressivo. Offrire una gamma di alternative che rispondano a differenti gusti stilistici o anche solo a riferimenti iconici è pertanto fondamentale nel contesto di un mercato open source.

Giunto 0



Proposta 1

La soluzione 1 deriva direttamente dal programma di progettazione generativa, selezionata per la sua efficace e intuitiva robustezza. La "mensola" come nelle saette dei supporti a palo o nelle radici contrafforte di certe piante tropicali è di intuitiva comprensione, unitamente al raccordo dei profili per ingentilire lo spessore di 3,5 mm.



Design	Generato dal software
Massa	133 g
Spessore pareti	3,5 mm
Peculiarità	Presenza di "costole" di rinforzo e forme organiche
Stile espressivo	Organico
Costo stimato	3,27 €

Proposta 2

Nella soluzione 2, elaborata dal progettista, la mensola acquista minimalità geometrica perdendo quel volume che non è strettamente necessario e riducendo di un poco lo spessore a vantaggio del consumo di materiale e della velocità di stampa.



Design	Rielaborato dal progettista
Massa	91 g
Spessore pareti	3 mm
Peculiarità	Utilizzo di ampi raccordi di rinforzo
Stile espressivo	Geometrico
Costo stimato	2,40 €

Proposta 3

Nella soluzione 3, elaborata dal progettista, i canotti, senza più mensole come nella conformazione originale, cambiano geometria (da parallelepipedi a tronco piramidali). Inoltre, per riequilibrare l'offerta di resistenza, lo spessore delle pareti cresce da 3 a 5 mm.



Design	Rielaborato dal progettista
Massa	119 g
Spessore pareti	Variabile 3-5 mm
Peculiarità	Rinforzo della struttura tramite la forma a tronco di piramide
Stile espressivo	Geometrico
Costo stimato	3,00 €

Proposta 4

Nella soluzione 4, elaborata dal progettista, il giunto viene elaborato nel compromesso tra geometria pura minimale e spessore tale da realizzare la prestazione meccanica cercata. Una soluzione al limite, comunque verificata dal software.



Design	Rielaborato dal progettista
Massa	103 g
Spessore pareti	4 mm
Peculiarità	Spessore maggiorato di tutto il giunto
Stile espressivo	Geometrico
Costo stimato	2,48 €



Figura 7.34
Dettaglio del Giunto A
nella versione geometrica
all'interno della
scaffalatura.

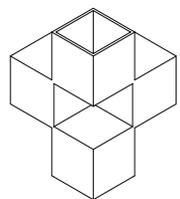
Figura 7.35
Dettaglio della
scaffalatura assemblata
con la versione
generativa del
Giunto A.



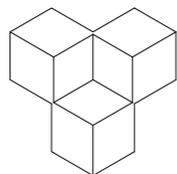
Giunto B

Il concetto fondante di questo giunto è dettato da canoni puramente stilistici. Si può affermare infatti che, tra le proposte, questa sia quella nata più come esercizio stilistico piuttosto che funzionale. Il principio cardine di sfida di questo giunto è rappresentato dal desiderio di voler svuotare l'angolo del giunto, situando le aste verticali in una posizione così detta "a sbalzo". Questo giunto permette di creare un telaio composto da sole aste, garantendo poi la possibilità di appoggiare i piani all'interno della cornice da loro creata.

Versioni



Versione per quattro aste (superiore, inferiore e laterali) e appoggiare il piano.



Versione per connettere tre aste (inferiore e laterali) e appoggiare il piano.

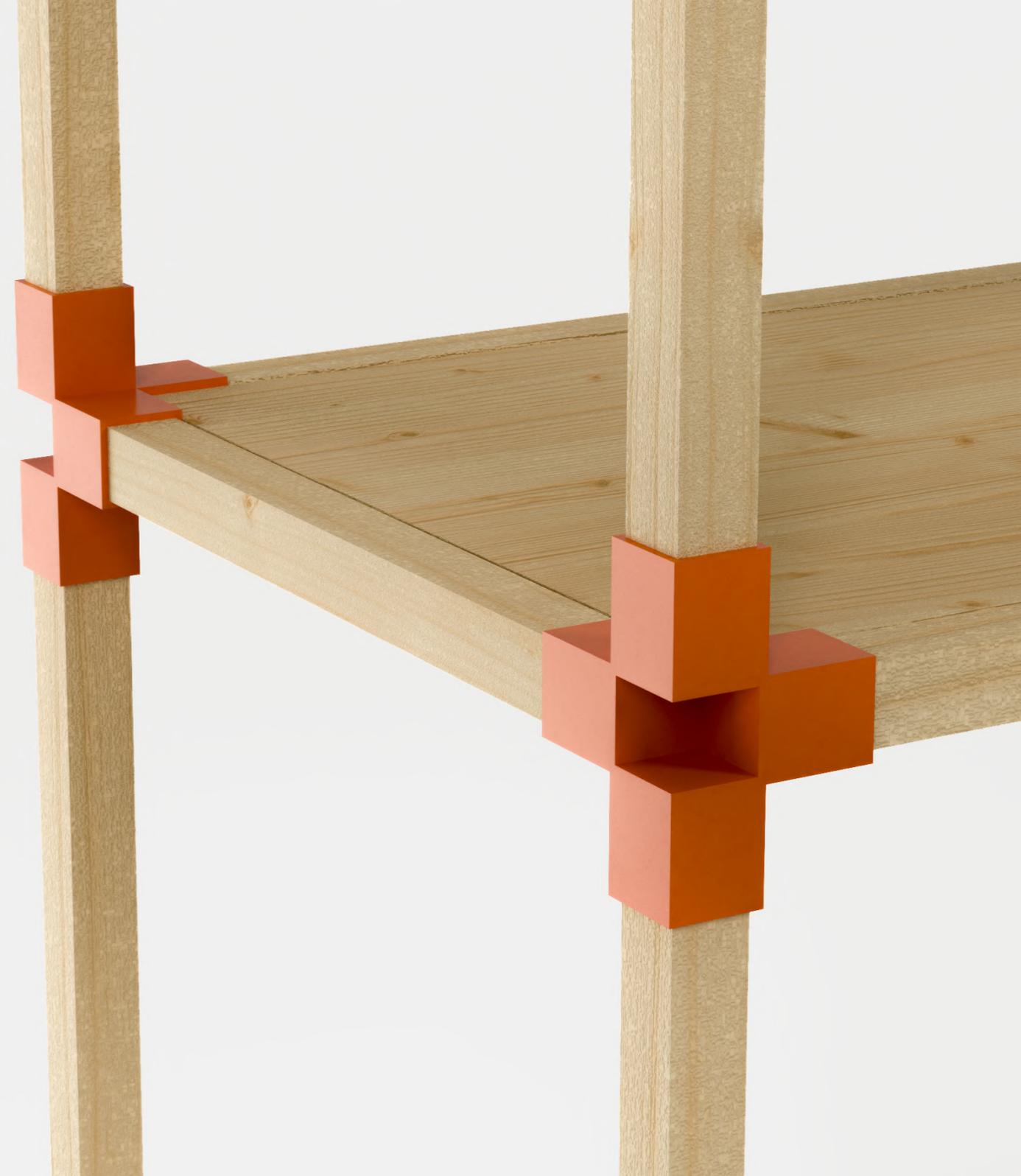


Tabella 7.8 ←
Le due differenti versioni del Giunto B.

Figura 7.36 →
Giunto B all'interno della scaffalatura che permette di assemblare.

Giunto B

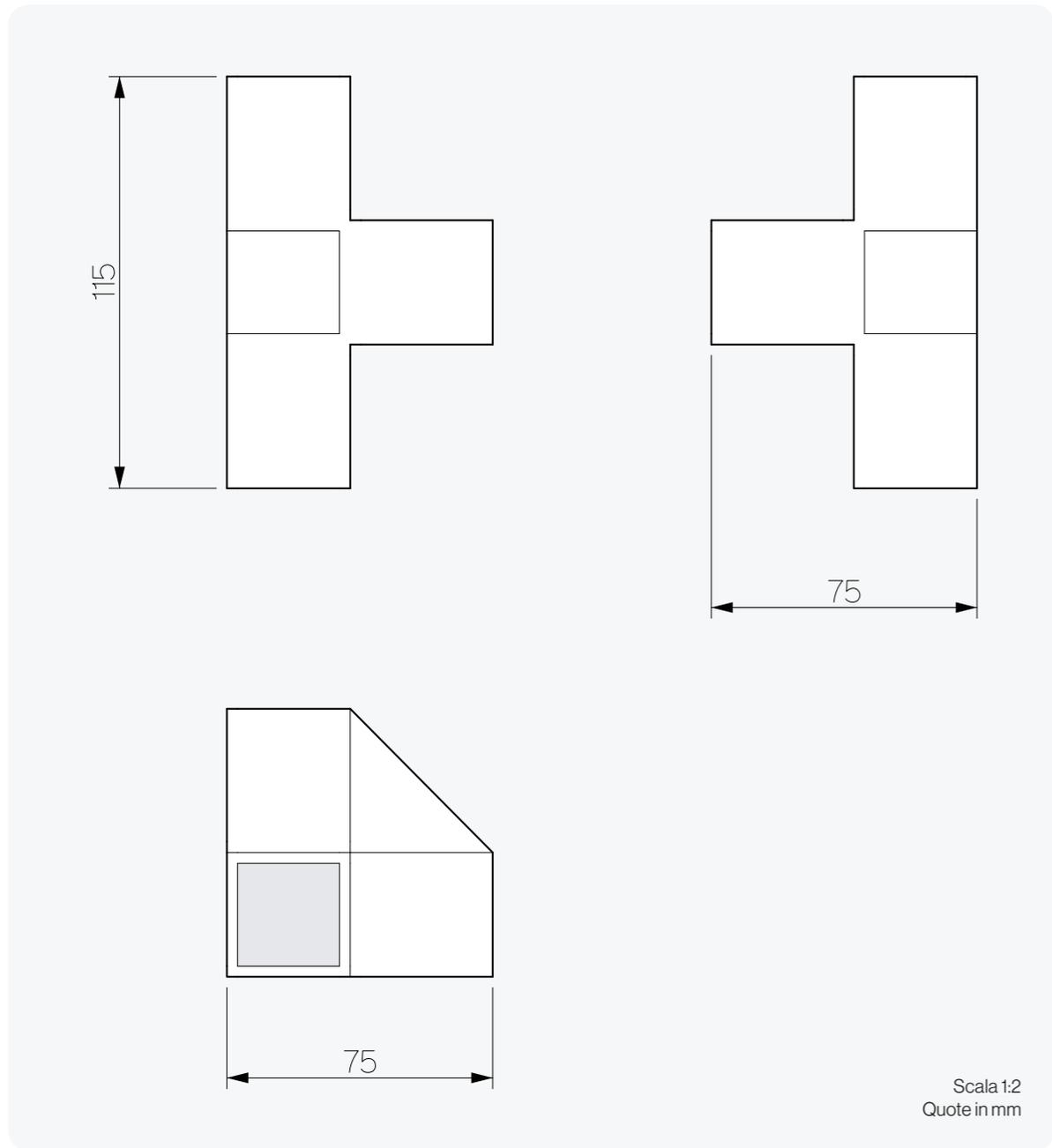


Figura 7.37
Proiezioni ortogonali del Giunto B.

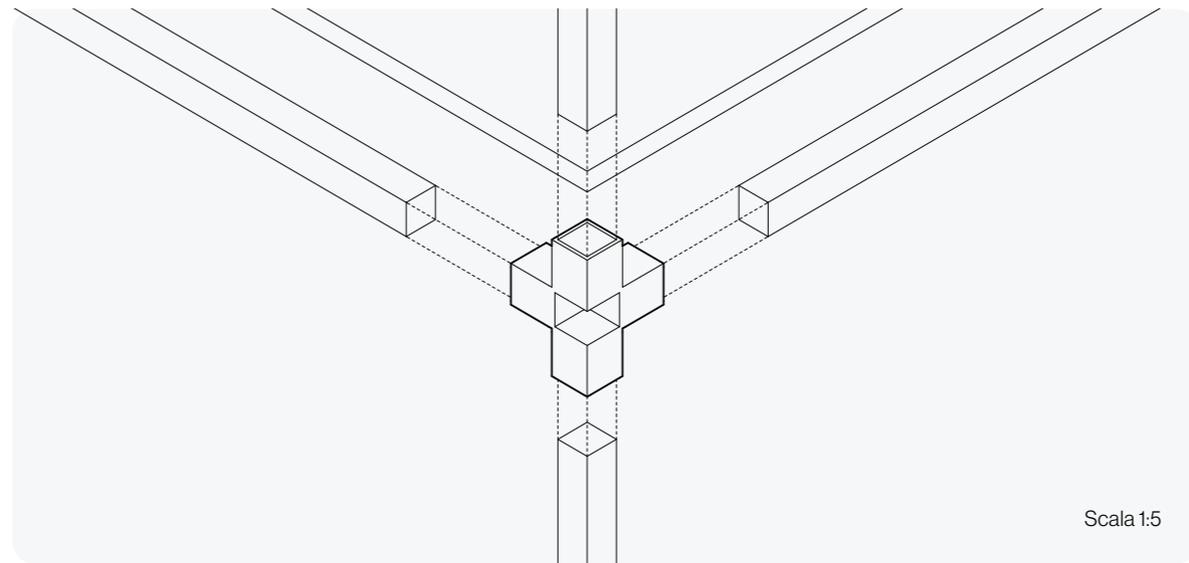
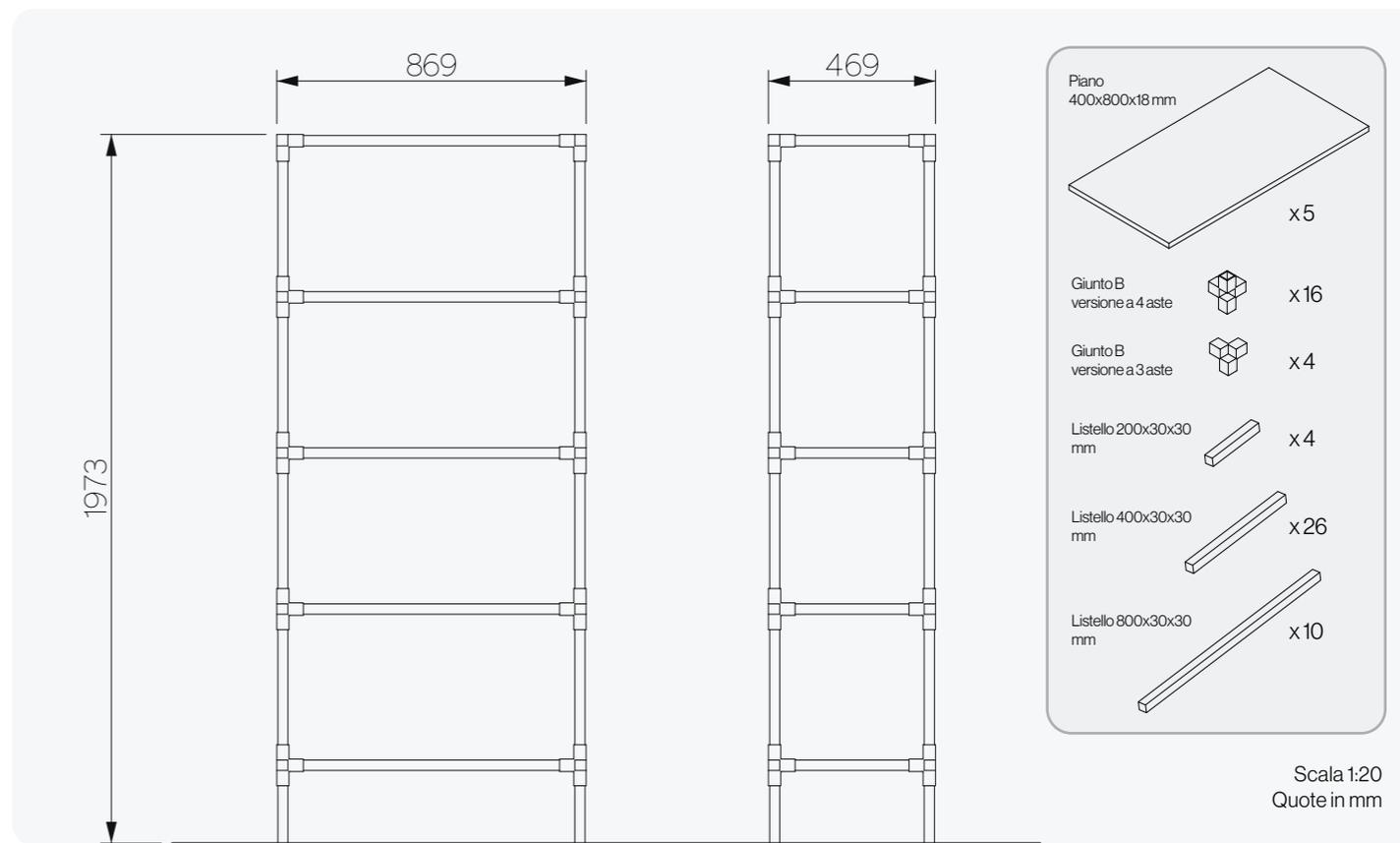


Figura 7.38 ←
Esploso assometrico del Giunto B e del metodo di inserimento nella scaffalatura di piani e aste.

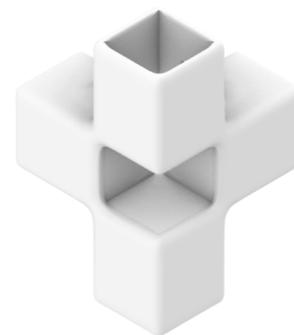
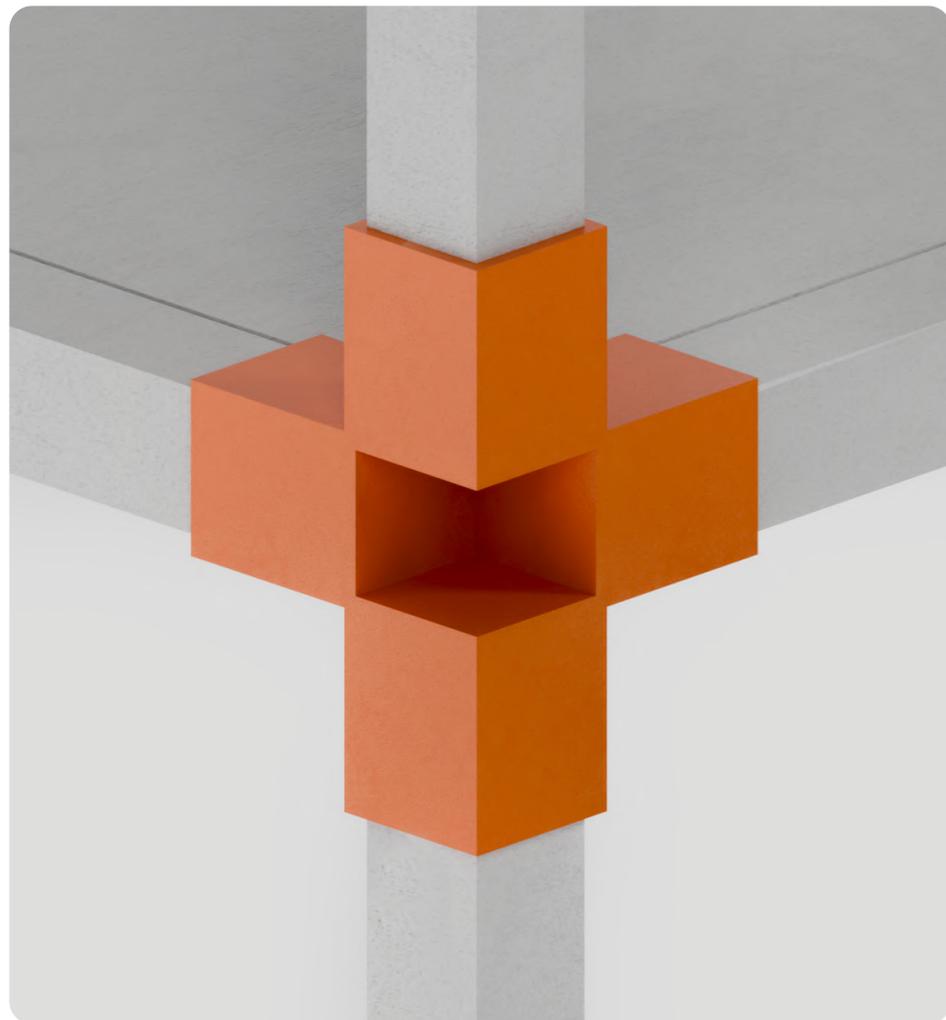
Figura 7.39 ↓
Proiezioni ortogonali e componenti di una scaffalatura a 5 piani assemblata tramite il Giunto B.



I risultati della rielaborazione: Giunto B

Anche per quanto riguarda questa giuntura sono state elaborate diverse proposte a partire dalla versione "Giunto 0".

Giunto 0



Proposta 1

Caratterizzato da un design di ispirazione biomorfa, risultato diretto dell'elaborazione generativa di Fusion 360. Le costole strutturali, simili a staffe di sostegno, creano un effetto di tensione visiva e funzionale, unendo le diverse parti con eleganza e stabilità.



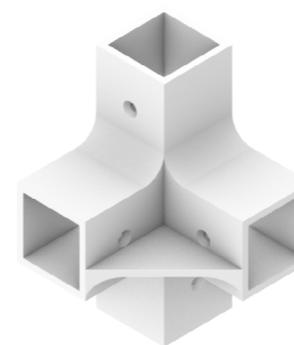
Proposta 2

La soluzione 2 è una reinterpretazione geometrica del Giunto 0 con l'implementazione di forme arrotondate. L'aggiunta di sottili staffe di supporto nei punti critici consente di rafforzare la struttura senza appesantirla, mantenendo uno spessore di 3 mm e un'estetica armoniosa.

Design	Generato dal software
Massa	132 g
Spessore pareti	3,5 mm
Peculiarità	Presenza di "costole" di rinforzo e forme organiche
Stile espressivo	Organico
Costo stimato	3,39 €

Design	Rielaborato dal progettista
Massa	110 g
Spessore pareti	3 mm
Peculiarità	Introduzione profili curvi di rinforzo
	Geometrico
Stile espressivo	
Costo stimato	2,19 €

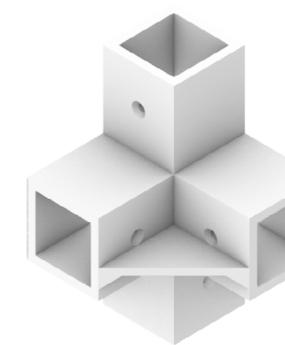
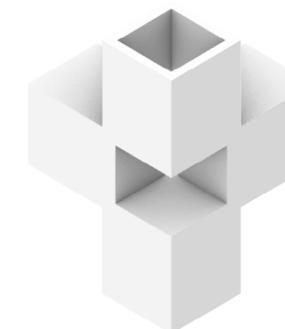
I risultati della rielaborazione: Giunto B



Design	Rielaborato dal progettista
Massa	103 g
Spessore pareti	3 mm
Peculiarità	Utilizzo di ampi raccordi di rinforzo
Stile espressivo	Geometrico
Costo stimato	2,06€

Proposta 3

La proposta 3 segue un approccio che sfrutta ampi raccordi per rinforzare la struttura, traducendo in geometria i principi del design generativo: rinforzi nei punti più critici. Gli angoli smussati e le connessioni arrotondate garantiscono resistenza e un equilibrio tra funzionalità e forma.



Design	Rielaborato dal progettista
Massa	135 g
Spessore pareti	4 mm
Peculiarità	Spessore maggiorato di tutto il giunto
Stile espressivo	Geometrico
Costo stimato	3,40€

Proposta 4

Una versione irrobustita del giunto originale (Giunto 0), che mantiene un'estetica geometrica rigorosa e priva di raccordi o smussi. L'aumento dello spessore delle pareti a 4 mm assicura una maggiore solidità strutturale senza compromettere il design essenziale.



Figura 7.40
Dettaglio del Giunto B
generativo all'interno
della scaffalatura.

Figura 7.41
Scaffalatura composta
del Giunto B nella ver-
sione geometrica.

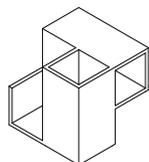


Giunto C

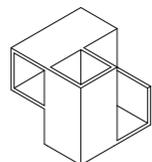
Il seguente concept nasce dal voler realizzare un giunto che permette di creare un telaio composto da aste verticali e orizzontali disposte su piani sfalsati in modo da sfruttarle come supporto per i piani, che potranno essere quindi appoggiati all'interno della struttura. Questa connessione presenta una peculiare forma che rimanda ai concetti di autocostruzione delle strutture in bambù connesse con elementi presenti in natura come corde e liane.

A differenza del Giunto A, questo permette di ottenere una struttura autoportante composta da sole aste, garantendo quindi maggiore flessibilità circa la configurazione che si desidera costruire. Contrariamente ai casi precedenti, il Giunto C non presenta delle vere e proprie varianti, bensì una versione "specchiata" dello stesso identico giunto per poterne garantire l'utilizzo.

Versioni



Versione normale del giunto.



Versione speculare del giunto.

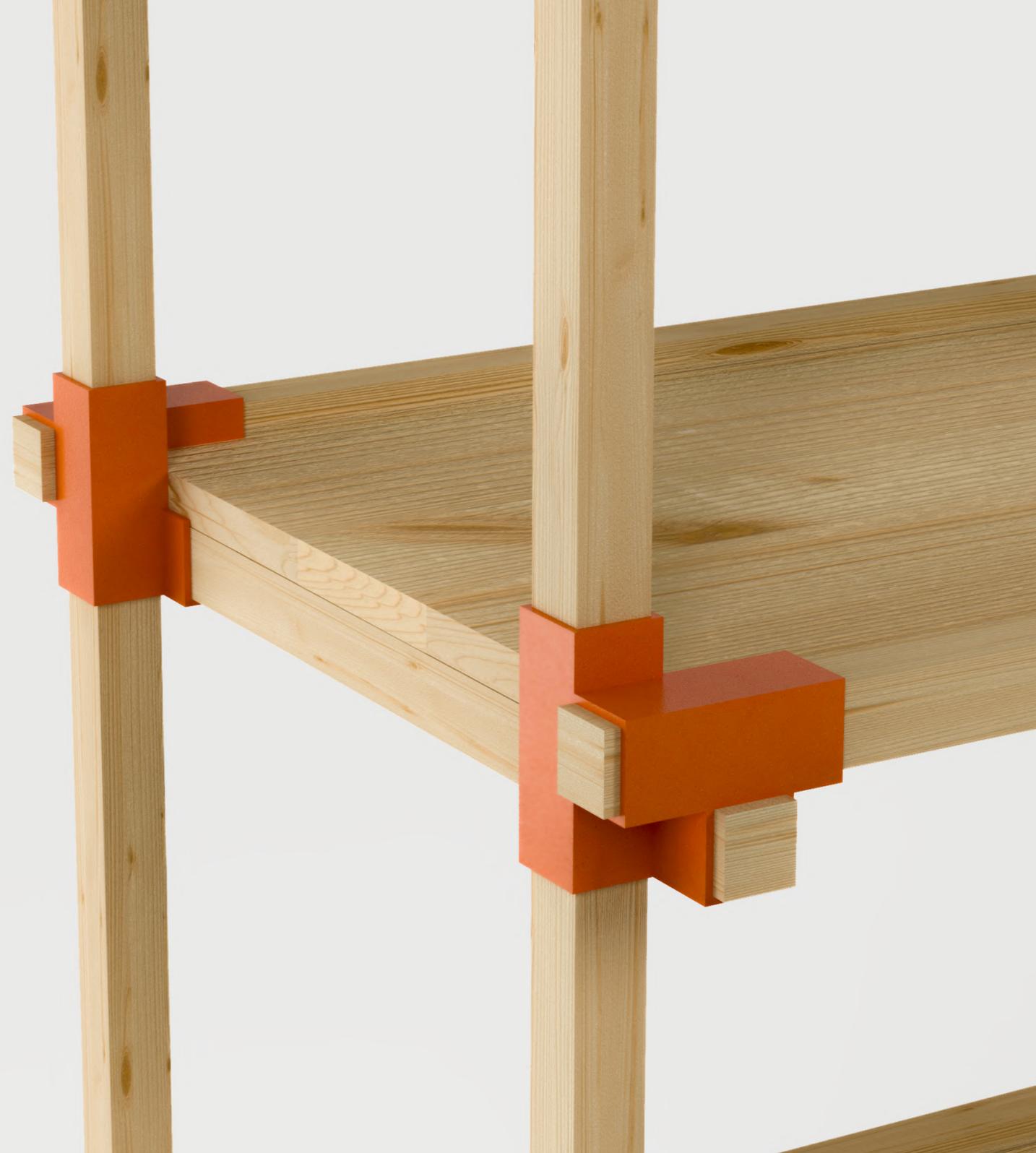


Tabella 7.9 ←
Le due versioni del
Giunto C.

Figura 7.42 →
Giunto C all'interno
della scaffalatura
che permette di
assemblare.

Giunto C

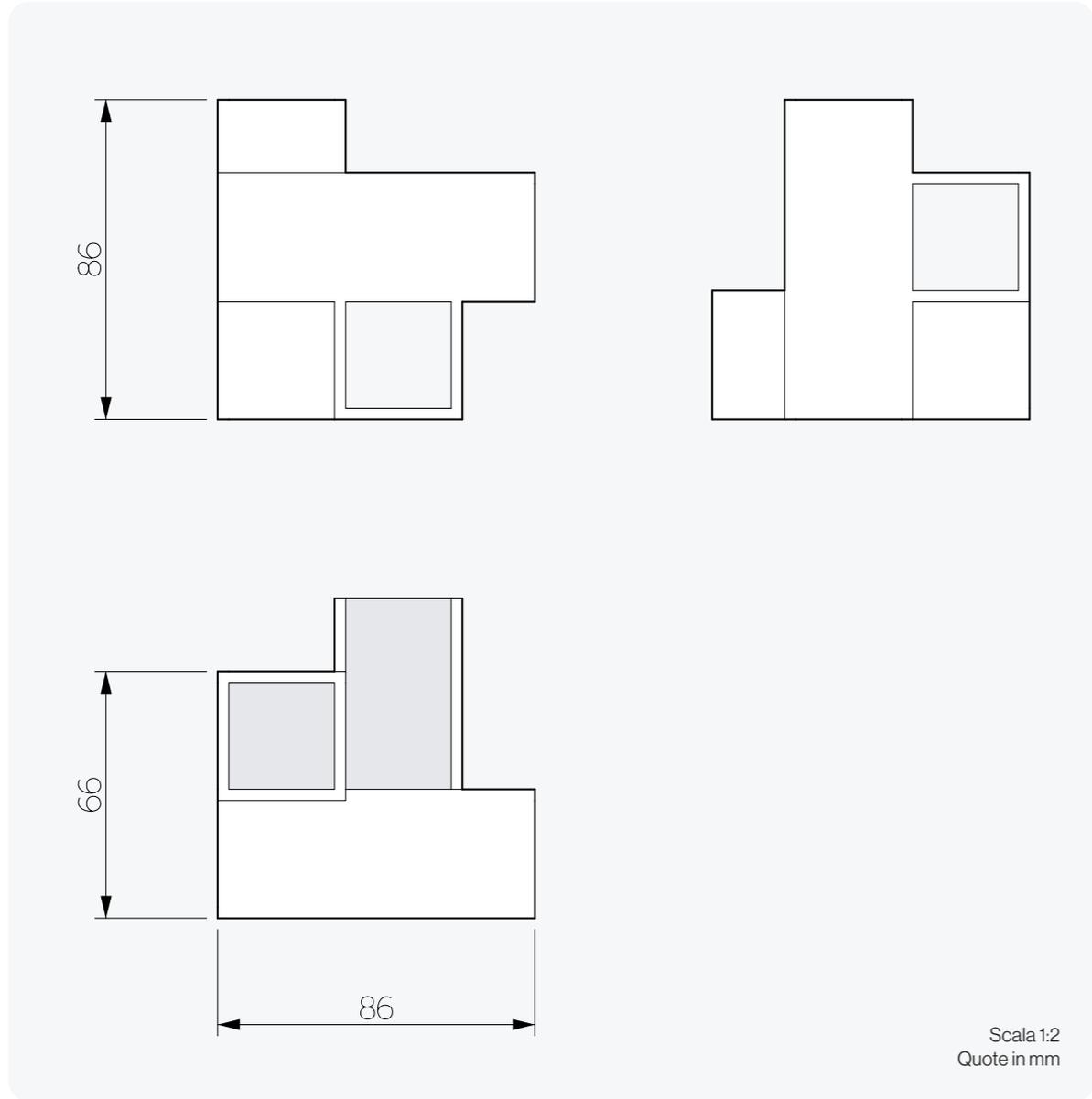


Figura 7.43
Proiezioni ortogonali del Giunto C.

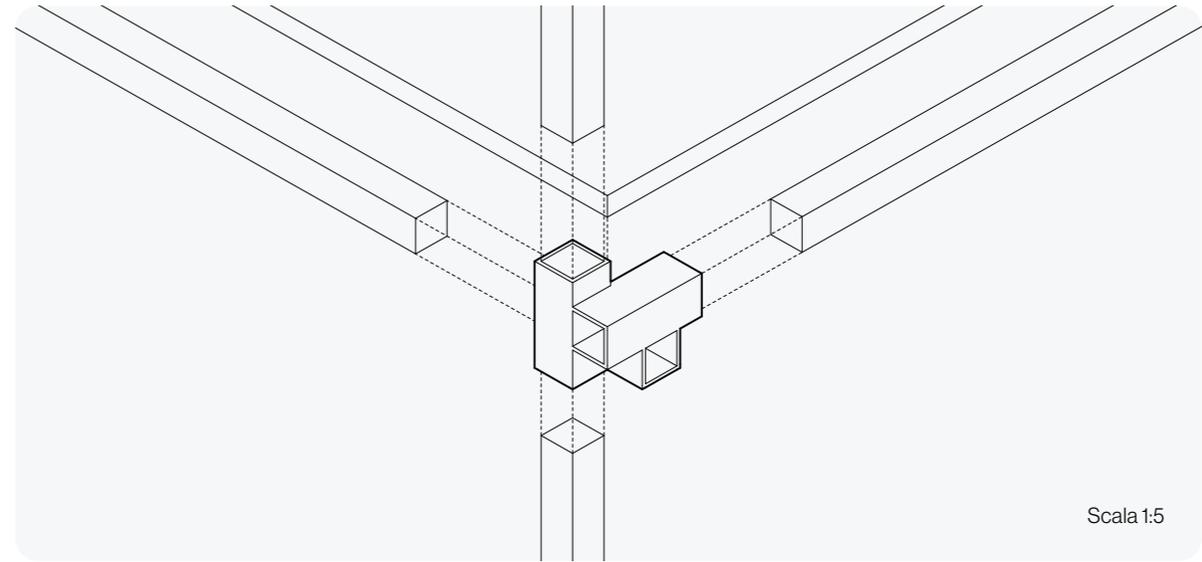
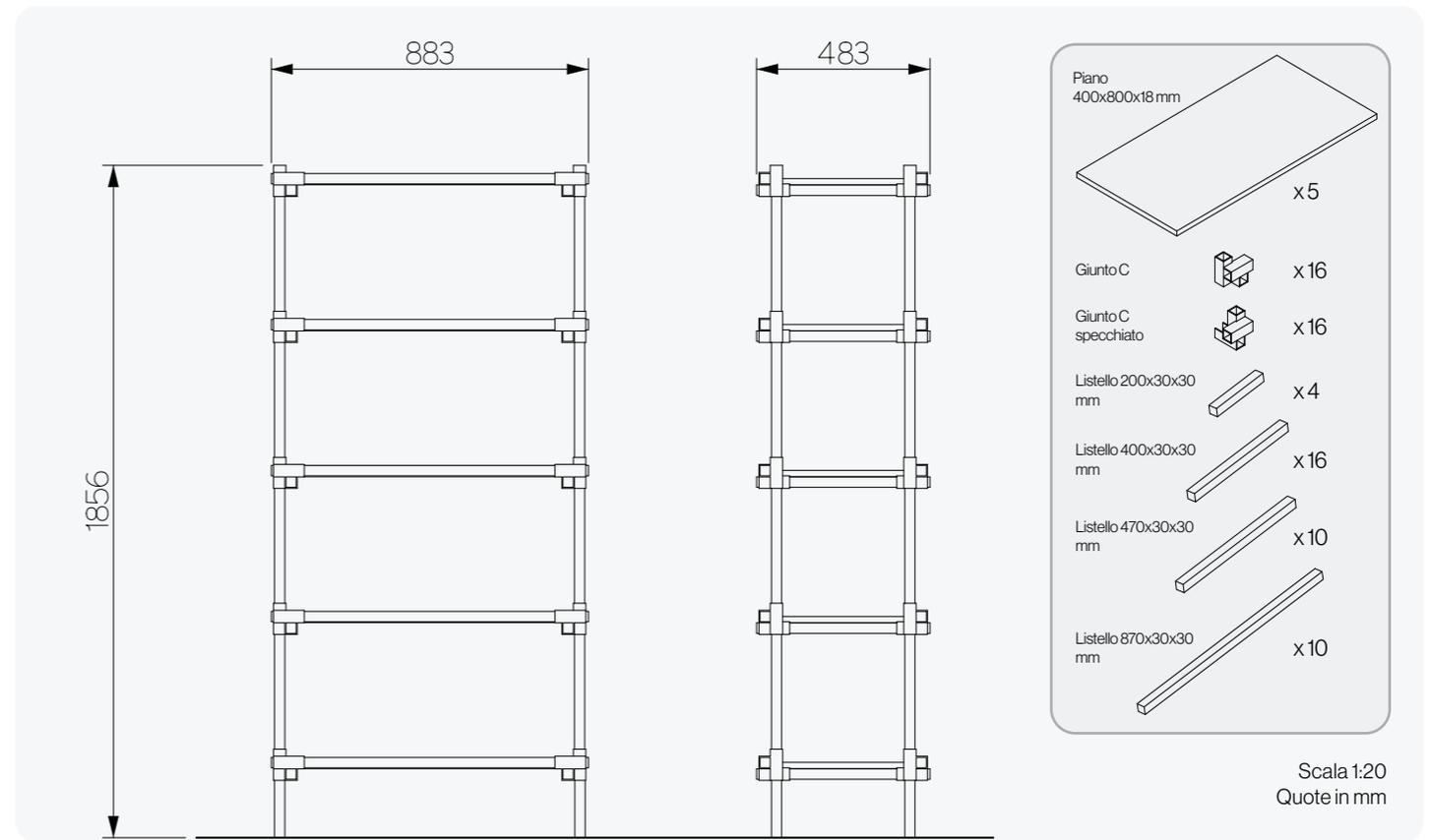


Figura 7.44 ←
Esploso assometrico del Giunto C e del metodo di inserimento nella scaffalatura di piani e aste.

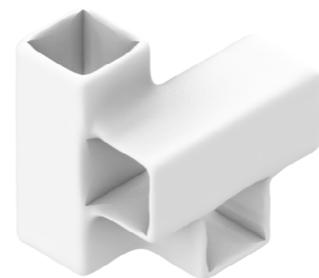
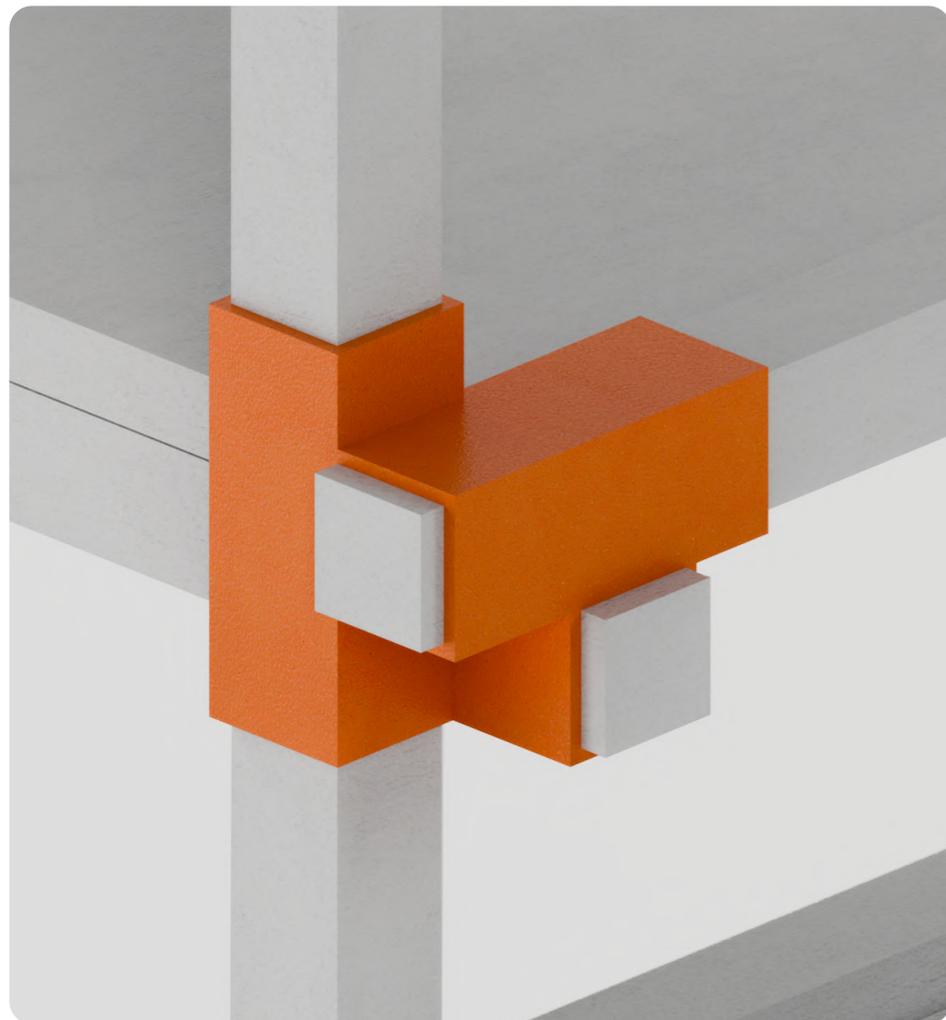
Figura 7.45 ↓
Proiezioni ortogonali e componenti di una scaffalatura a 5 piani assemblata tramite il Giunto C.



I risultati della rielaborazione: Giunto C

Nel caso del Giunto C, l'esplorazione tramite Fusion 360 ha portato a pochi risultati, nessuno dei quali si è rivelato vantaggioso in termini di efficienza materica o convincente dal punto di vista espressivo. L'unica che si è distinta è la proposta 1, che ha confermato il design originale, richiedendo solo minimi interventi.

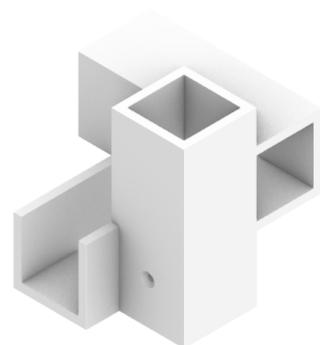
Giunto 0



Design	Generato dal software
Massa	122 g
Spessore pareti	3,5 mm
Peculiarità	Presenza di raccordi di rinforzo e forme curvilinee
Stile espressivo	Organico
Costo stimato	3,55 €

Proposta 1

La proposta 1 è caratterizzata da un design morbido e organico, con superfici che evocano l'effetto della cera sciolta. Le linee sinuose, oltre a conferire un'estetica raffinata insieme allo spessore delle sezioni contenuto, garantiscono stabilità strutturale grazie ai raccordi dei profili.



Design	Rielaborato dal progettista
Massa	141 g
Spessore pareti	4 mm
Peculiarità	Spessore maggiorato di tutto il giunto
Stile espressivo	Geometrico
Costo stimato	3,98 €

Proposta 2

Frutto della rielaborazione da parte del progettista, si distingue per un'estetica geometrica e rigorosa, caratterizzata da volumi definiti e spessori maggiorati. La struttura massiccia, con pareti più robuste, enfatizza la solidità del giunto, assicurandone una tenuta strutturale ottimale.



Figura 7.46
Dettaglio del Giunto C
geometrico all'interno
della scaffalatura.

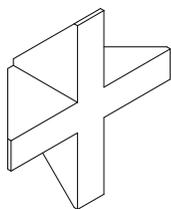


Figura 7.47
Immagine dello
scaffale composto
dal Giunto C nella
versione generativa.

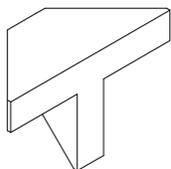
Giunto D

Questa soluzione è stata pensata con l'obiettivo di connettere piani tra di loro. La principale sfida di questo tipo di connessione consiste nel garantire una presa stabile sui piani senza appesantire eccessivamente le geometrie, occupando spazio sui ripiani e compromettendone l'estetica. La forma a croce in questo caso risulta la soluzione più vantaggiosa, poiché minimizza l'impatto visivo integrandosi con il profilo frontale dei piani affiancati. Il principio di modularità su cui si basa questo giunto offre un'ampia libertà compositiva, consentendo di creare strutture personalizzabili e adattabili alle proprie esigenze. Inoltre, questa forma risulta molto versatile per la realizzazione dei piedi della scaffalatura, ottenibili senza la necessità di utilizzare pezzi di legno ausiliari e tantomeno varianti del giunto stesso. Sono comunque presenti delle ulteriori versioni del giunto perché siano adatte in base alla parte della scaffalatura che andranno a connettere.

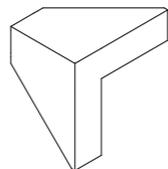
Varianti



Versione per connettere quattro piani (superiore, inferiore e laterali).



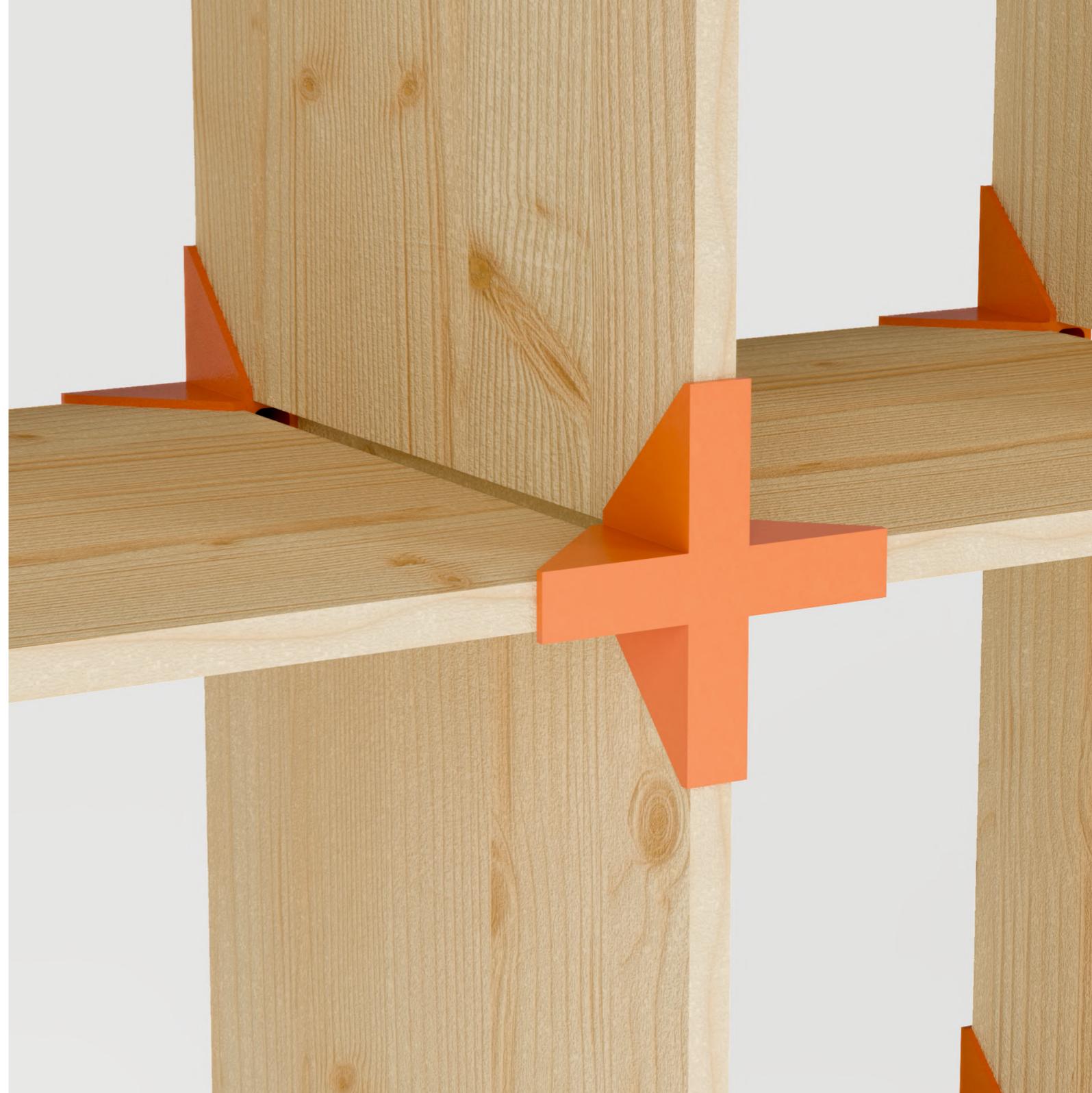
Versione a tre piani (due nella stessa direzione, uno perpendicolare).



Versione per connettere due piani ad angolo di 90°.

Tabella 7.10 ←
Le tre differenti versioni del Giunto D.

Figura 7.48 →
Giunto D all'interno della scaffalatura di soli piani che permette di assemblare.



Giunto D

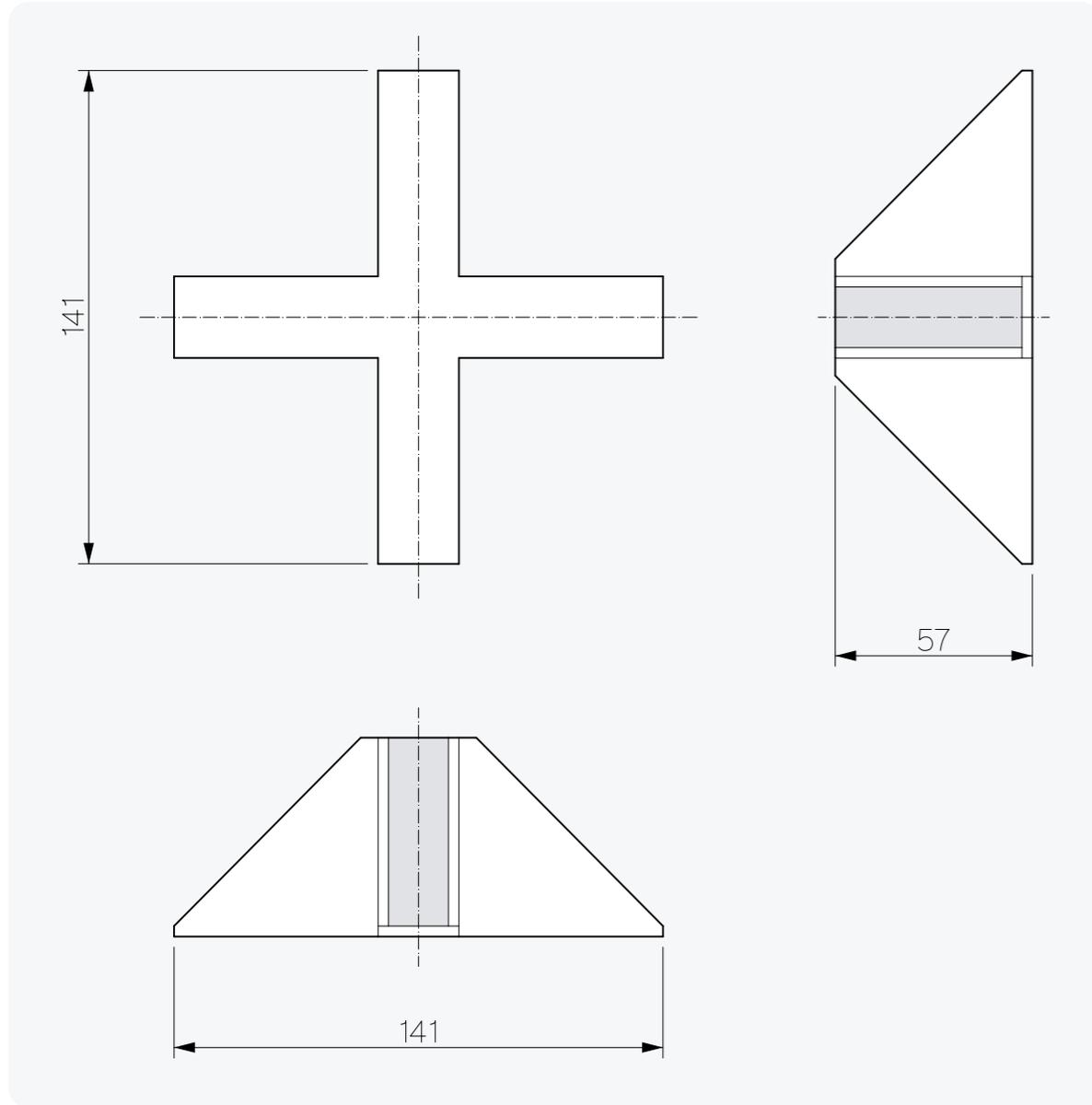
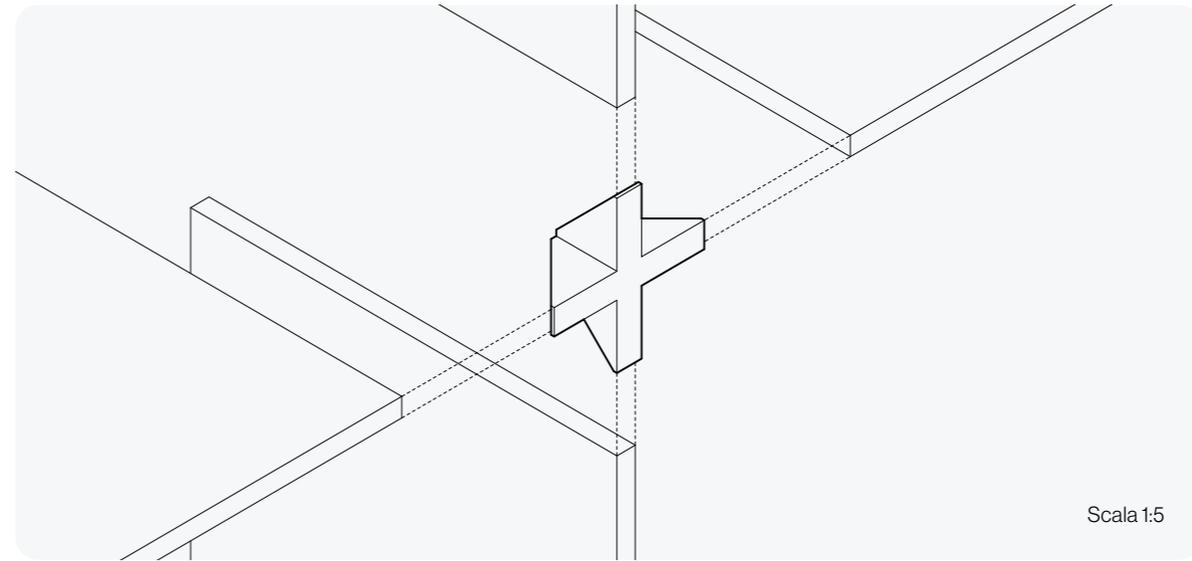


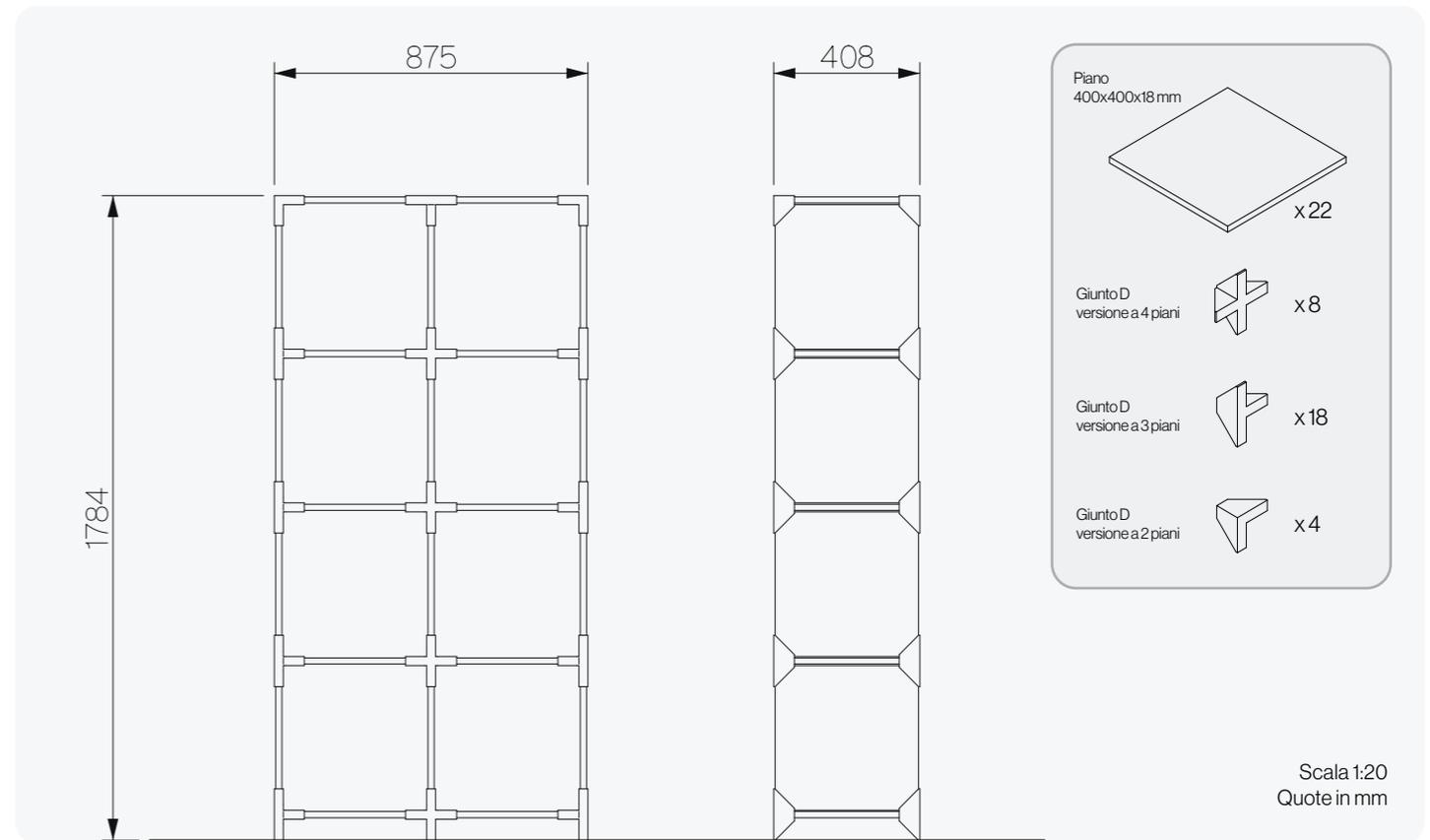
Figura 7.49
Proiezioni ortogonali del Giunto D.



Scala 1:5

Figura 7.50 ←
Esploso assometrico del Giunto D e del metodo di inserimento nella scaffalatura di piani e aste.

Figura 7.51 ↓
Proiezioni ortogonali e componenti di una scaffalatura a 5 piani assemblata tramite il Giunto D.



Scala 1:20
Quote in mm

I risultati della rielaborazione: Giunto D

Così come per il Giunto C, anche questo, in seguito alla generazione con Fusion 360, si è dimostrato essere già sufficientemente resistente, infatti l'unica soluzione espressivamente rilevante, la Proposta 1, interviene unicamente con raccordi nei punti più critici, senza necessità di modifiche strutturali significative.

Giunto 0



Design	Generato dal software
Massa	141 g
Spessore pareti	Variable 2,5-5 mm
Peculiarità	Introduzione di raccordi di rinforzo e forme biomorfe
Stile espressivo	Organico
Costo stimato	2,82 €

Proposta 1

Un design curvilineo generato dal programma, con raccordi di rinforzo strategici nei punti più sollecitati. L'ottimizzazione dei materiali si traduce in spessori variabili: alcune aree sono rinforzate fino a 5 mm, mentre altre si assottigliano a 2,5 mm, garantendo un equilibrio tra resistenza e leggerezza.



Design	Rielaborato dal progettista
Massa	120 g
Spessore pareti	4 mm
Peculiarità	Spessore maggiorato di tutto il giunto
Stile espressivo	Geometrico
Costo stimato	2,40 €

Proposta 2

Una reinterpretazione minimale fatta dal progettista ispirata al Giunto 0, con linee essenziali e razionali che formano una struttura semplice. L'uniformità dello spessore a 4 mm, in linea con le soluzioni adottate per i giunti A, B e C, assicura solidità mantenendo un'estetica pulita e funzionale.



Figura 7.52
Dettaglio del Giunto D
generativo all'interno
della scaffalatura.

Figura 7.53
Utilizzo dello scaffale
con il Giunto D nella
versione geometrica.



7.6 Prototipazione dei giunti

La fase di realizzazione dei giunti progettati, avvenuta tramite stampa 3D, ha permesso di verificare concretamente le soluzioni sviluppate. L'utilizzo della prototipazione rapida è stata utile per testare concretamente le geometrie, valutare la resistenza strutturale e ottimizzare i parametri di produzione, trovando un equilibrio tra fattibilità tecnica ed efficienza economica, analizzando inoltre le caratteristiche e i limiti di questa tecnologia. Uno degli aspetti più rilevanti è stato lo studio dell'orientamento dei pezzi durante la stampa, così da minimizzare la necessità di supporti e quindi di materiale, ridurre i tempi di produzione e ottimizzare la resistenza meccanica gestendo l'anisotropia degli strati.



Figura 7.54
Alcuni dei giunti stampati in 3D.

Materiale e dispositivo di stampa

Per poter realizzare le connessioni è stato fondamentale scegliere il materiale e il modello di stampante 3D con cui realizzarli. Considerando che i giunti sono pensati per un mercato open source, è stato selezionato il PLA, poiché è il materiale più diffuso e facilmente accessibile per gli utenti domestici dotati di una stampante 3D. Negli ultimi anni il mercato della stampa 3D ha visto un'enorme crescita nella produzione di PLA da parte delle aziende, portando alla disponibilità di un'ampia gamma di colori e finiture. Oggi si trovano filamenti con effetti opachi, lucidi, metallizzati, traslucidi e persi-

no brillantinati, offrendo grande scelta per ogni esigenza estetica e funzionale. Per questo progetto la scelta è ricaduta sul filamento PolyTerra, noto per la qualità dei suoi materiali e per le interessanti varianti cromatiche con finiture opache. Nello specifico, i giunti sono stati stampati utilizzando il colore PolyTerra Sunrise Orange (Figura 7.55) per quelli geometrici, mentre per quelli con forme organiche generati da Fusion è stato scelto il PolyTerra Artic Teal. Entrambe sono tonalità molto vivide che si integrano armoniosamente con la gamma di colori del legno, valorizzandone l'aspetto.

Figura 7.55
Bobina di filamento PLA PolyTerra da 1 kg utilizzata per realizzare i giunti [206].



Figura 7.56
Bambu Lab X1C, una delle stampanti FDM domestiche più diffuse, Bambu Lab, 2023 [207].

Per la realizzazione dei prototipi è stata impiegata una stampante Bambu Lab X1C (Figura 7.56), uno dei modelli più avanzati tra le stampanti 3D domestiche. Questa macchina è stata scelta per le sue elevate prestazioni, che combinano un'ottima qualità di stampa con una velocità di estrusione molto elevata. Nello specifico, la stampa dei giunti è stata effettuata con questo modello di stampante presso il virtualLAB del Politecnico di Torino.

Linee guida per la stampa: Gunto A

Per ottenere i migliori risultati possibili in termini di prestazioni, qualità, costo e tempi di stampa, è stato necessario studiare attentamente le caratteristiche e i limiti della tecnologia di Additive Manufacturing, al fine di sfruttarla nel modo più efficiente. Sono state quindi definite precise linee guida per la realizzazione dei giunti, con l'obiettivo di supportare gli utenti che, grazie alla diffusione open source dei progetti, potranno stampare autonomamente le giunzioni senza errori, assicurandone la corretta esecuzione. Oltre alle istruzioni di stampa sono riportate tutte le informazioni di consumo materico, costo e tempistiche di realizzazione per ogni giunto.

Figura 7.57 →

Immagine che mostra il corretto orientamento da utilizzare per stampare il Giunto A.

Tabella 7.11 ↙

Tabella con i parametri e le informazioni riguardo la stampa del Giunto A nella sua versione geometrica.

Tabella 7.12 ↓

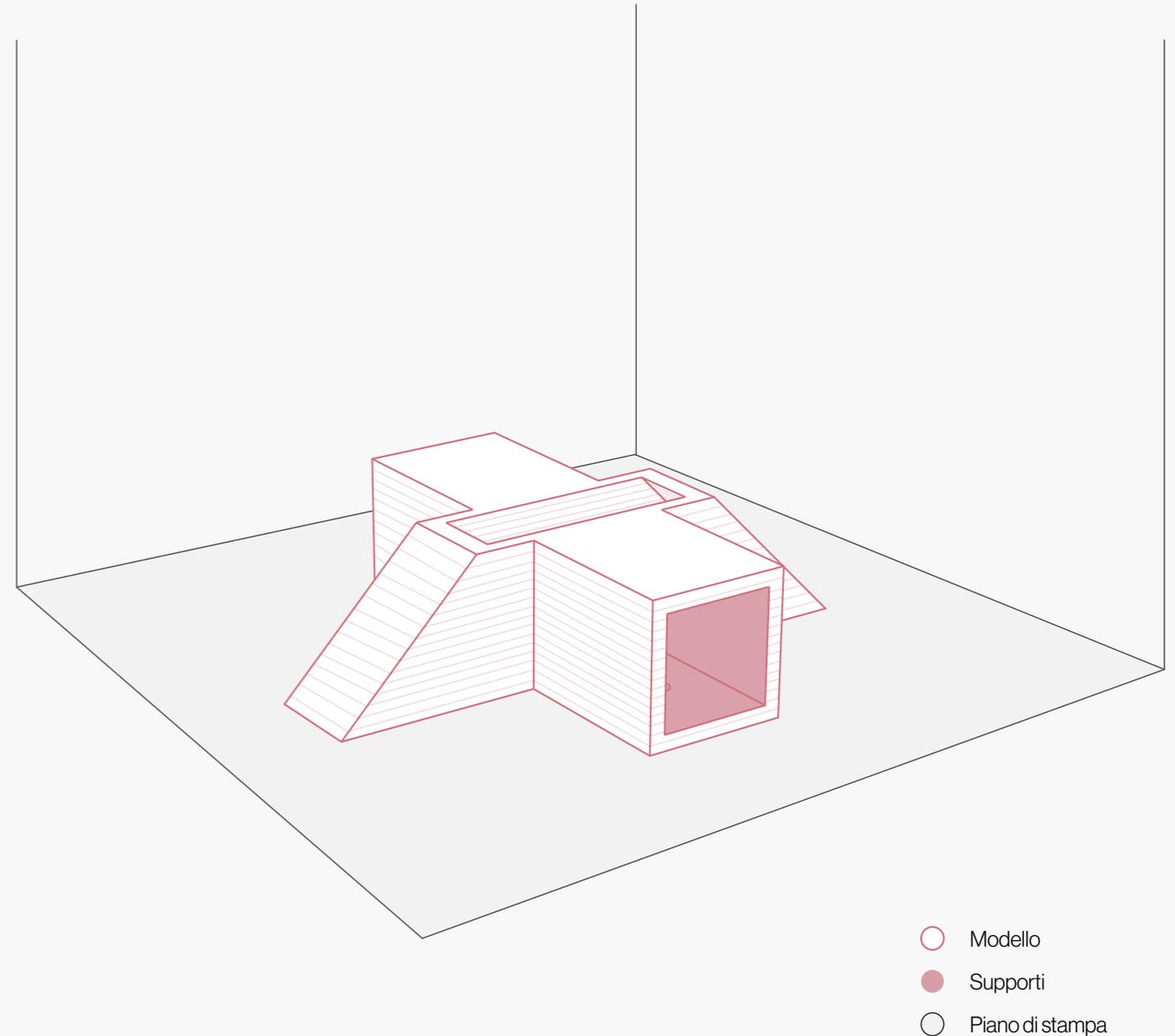
Tabella con i parametri e le informazioni riguardo la stampa del Giunto A nella sua versione generativa.

Giunto A - Versione geometrica

Materiale	PLA
Qualità/altezza degli strati	0,2 mm
Densità di riempimento	100%
Supporti	Si
Tempo di stampa	2 h 52 min
Filamento totale	124 g
Filamento solo del modello	103 g
Costo	2,48 €

Giunto A - Versione generativa

Materiale	PLA
Qualità/altezza degli strati	0,2 mm
Densità di riempimento	100%
Supporti	Si
Tempo di stampa	3 h 50 min
Filamento totale	164 g
Filamento solo del modello	133 g
Costo	3,27 €



Linee guida per la stampa: Gunto B

Figura 7.58 →

Immagine che mostra il corretto orientamento da utilizzare per stampare il Gunto B.

Tabella 7.13 ↙

Tabella con i parametri e le informazioni riguardo la stampa del Gunto B nella sua versione geometrica.

Tabella 7.14 ↓

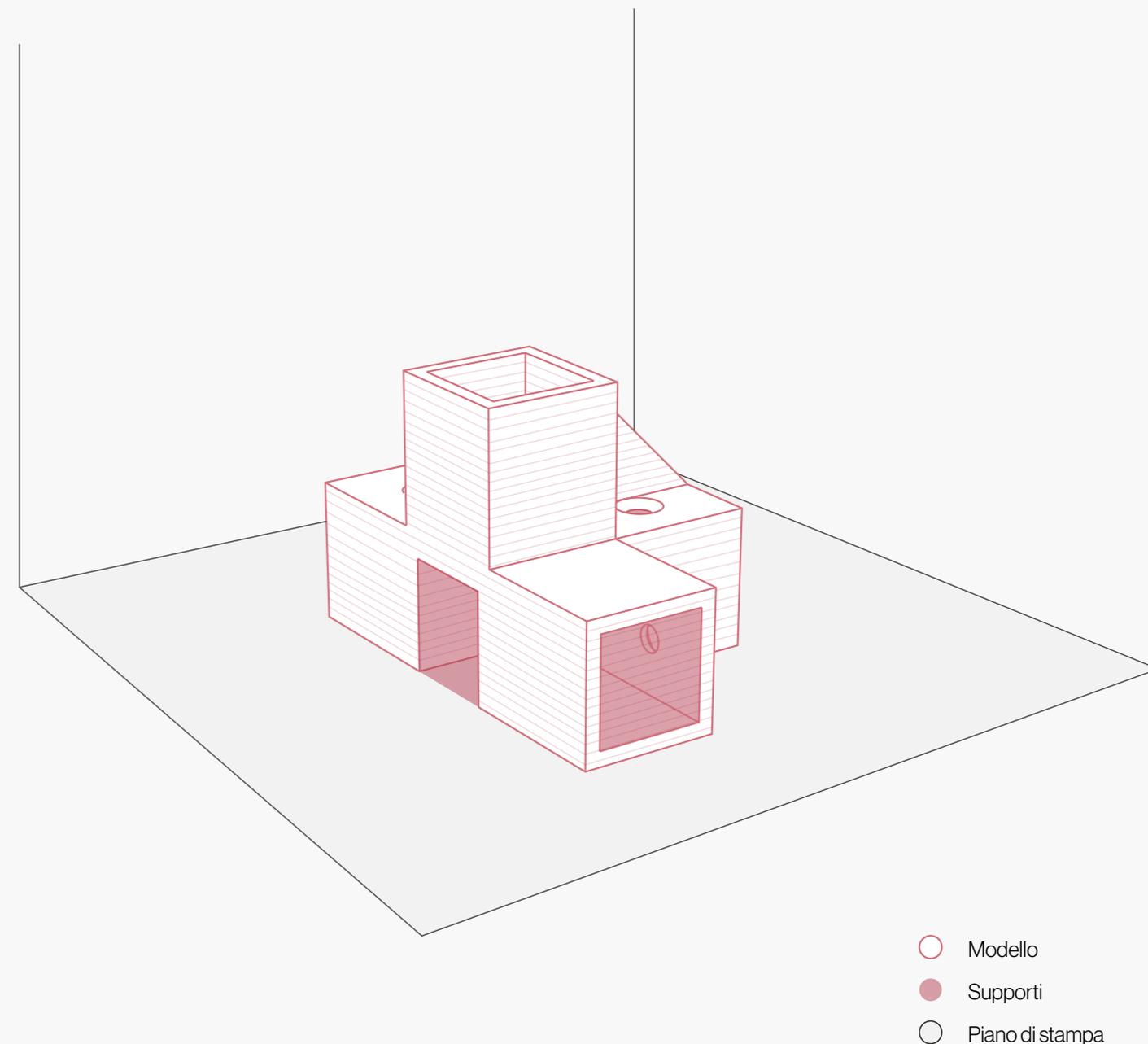
Tabella con i parametri e le informazioni riguardo la stampa del Gunto B nella sua versione generativa.

Giunto B - Versione geometrica

Materiale	PLA
Qualità/altezza degli strati	0,2 mm
Densità di riempimento	100%
Supporti	Sì
Tempo di stampa	3 h 48 min
Filamento totale	170 g
Filamento solo del modello	135 g
Costo	3,40 €

Giunto B - Versione generativa

Materiale	PLA
Qualità/altezza degli strati	0,2 mm
Densità di riempimento	100%
Supporti	Sì
Tempo di stampa	3 h 52 min
Filamento totale	169 g
Filamento solo del modello	132 g
Costo	3,39 €



Linee guida per la stampa: Gunto C

Figura 7.59 →

Immagine che mostra il corretto orientamento da utilizzare per stampare il giunto C.

Tabella 7.15 ↙

Tabella con i parametri e le informazioni riguardo la stampa del giunto C nella sua versione geometrica.

Tabella 7.16 ↓

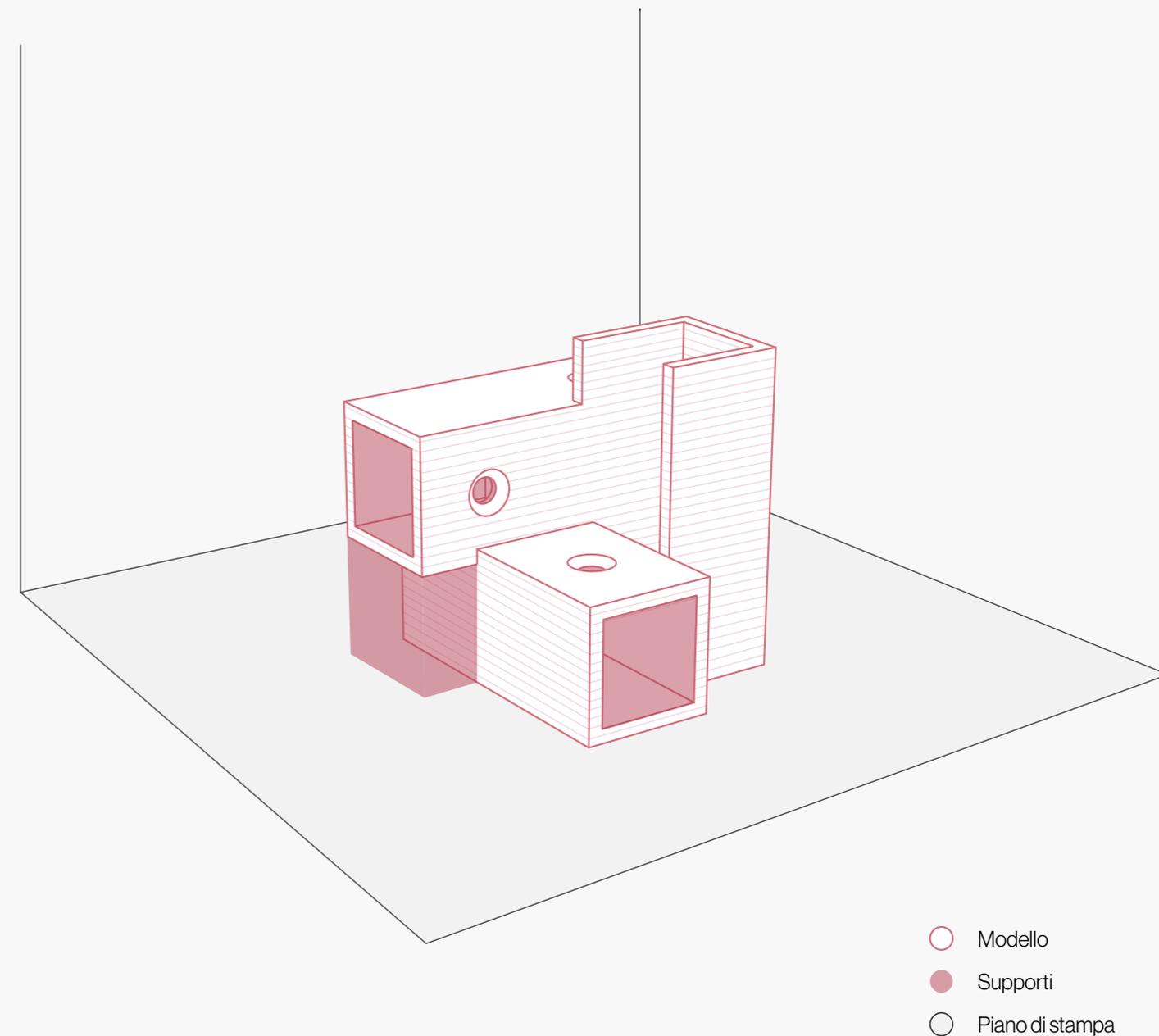
Tabella con i parametri e le informazioni riguardo la stampa del giunto C nella sua versione generativa.

Giunto C - Versione geometrica

Materiale	PLA
Qualità/altezza degli strati	0,2 mm
Densità di riempimento	100%
Supporti	Sì
Tempo di stampa	4 h 27 min
Filamento totale	199 g
Filamento solo del modello	141 g
Costo	3,98 €

Giunto C - Versione generativa

Materiale	PLA
Qualità/altezza degli strati	0,2 mm
Densità di riempimento	100%
Supporti	Sì
Tempo di stampa	4 h 08 min
Filamento totale	177 g
Filamento solo del modello	122 g
Costo	3,55 €



- Modello
- Supporti
- Piano di stampa

Linee guida per la stampa: Gunto D

Figura 7.60 →

Immagine che mostra il corretto orientamento da utilizzare per stampare il Gunto D.

Tabella 7.17 ↙

Tabella con i parametri e le informazioni riguardo la stampa del Gunto D nella sua versione geometrica.

Tabella 7.18 ↓

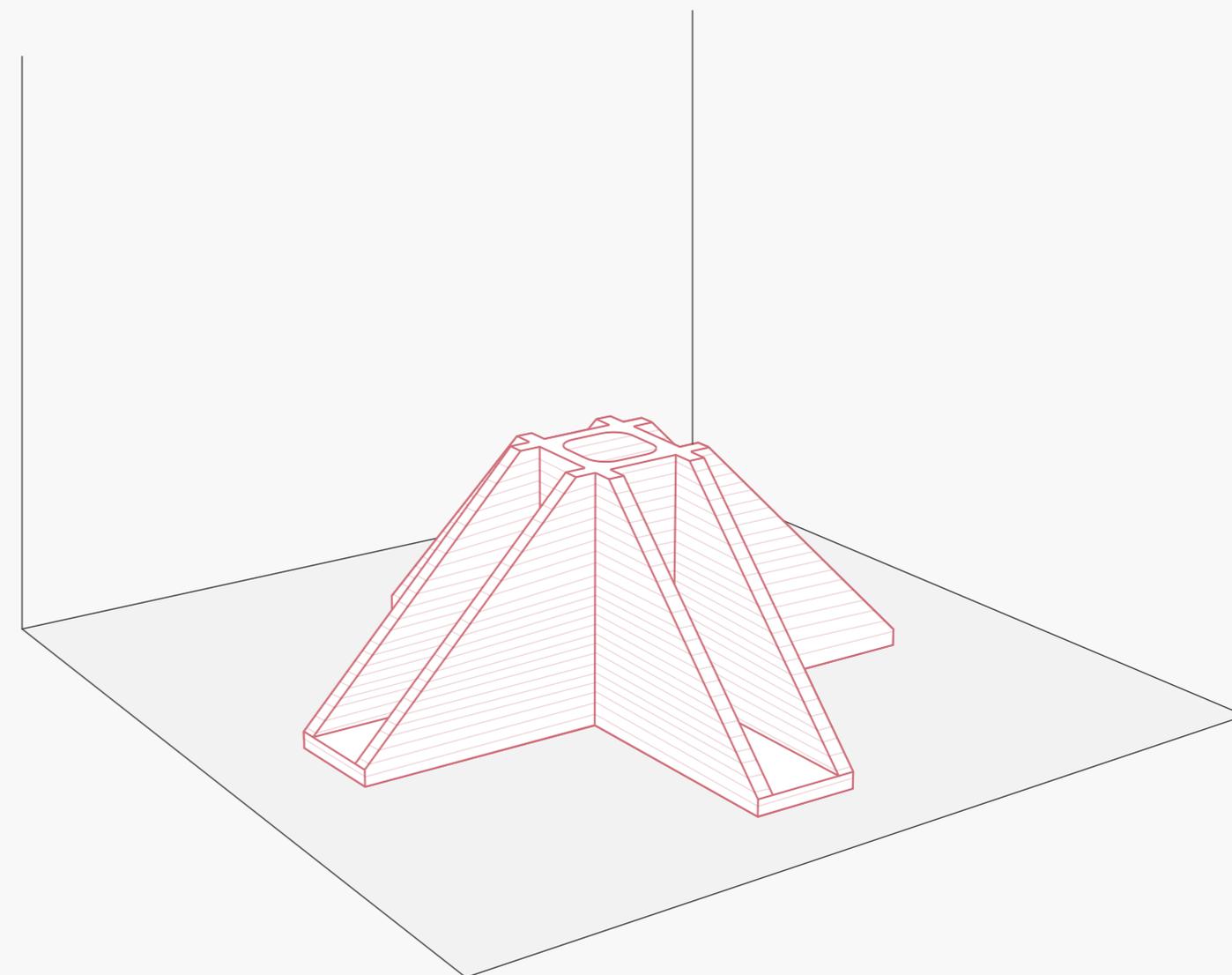
Tabella con i parametri e le informazioni riguardo la stampa del Gunto D nella sua versione generativa.

Giunto D - Versione geometrica

Materiale	PLA
Qualità/altezza degli strati	0,2 mm
Densità di riempimento	100%
Supporti	No
Tempo di stampa	2 h 47 min
Filamento totale	120 g
Filamento solo del modello	120 g
Costo	2,40 €

Giunto D - Versione generativa

Materiale	PLA
Qualità/altezza degli strati	0,2 mm
Densità di riempimento	100%
Supporti	No
Tempo di stampa	3 h 16 min
Filamento totale	141 g
Filamento solo del modello	141 g
Costo	2,82 €



- Modello
- Supporti
- Piano di stampa

La stampa

L'orientamento dei pezzi durante il processo di stampa è stato un fattore chiave per migliorare l'efficienza e le prestazioni del manufatto finale.

Poiché la stampa 3D, in particolare quella a deposizione di filamento fuso (FDM), introduce una certa anisotropia dovuta alla stratificazione del materiale, è essenziale orientare i componenti in modo da massimizzare la resistenza nelle direzioni più sollecitate e garantire una maggiore affidabilità meccanica del pezzo. Al tempo stesso, è stato fondamentale trovare una soluzione che cercasse di ridurre al minimo la necessità di supporti, limitando così lo spreco di materiale e di conseguenza i tempi di produzione.

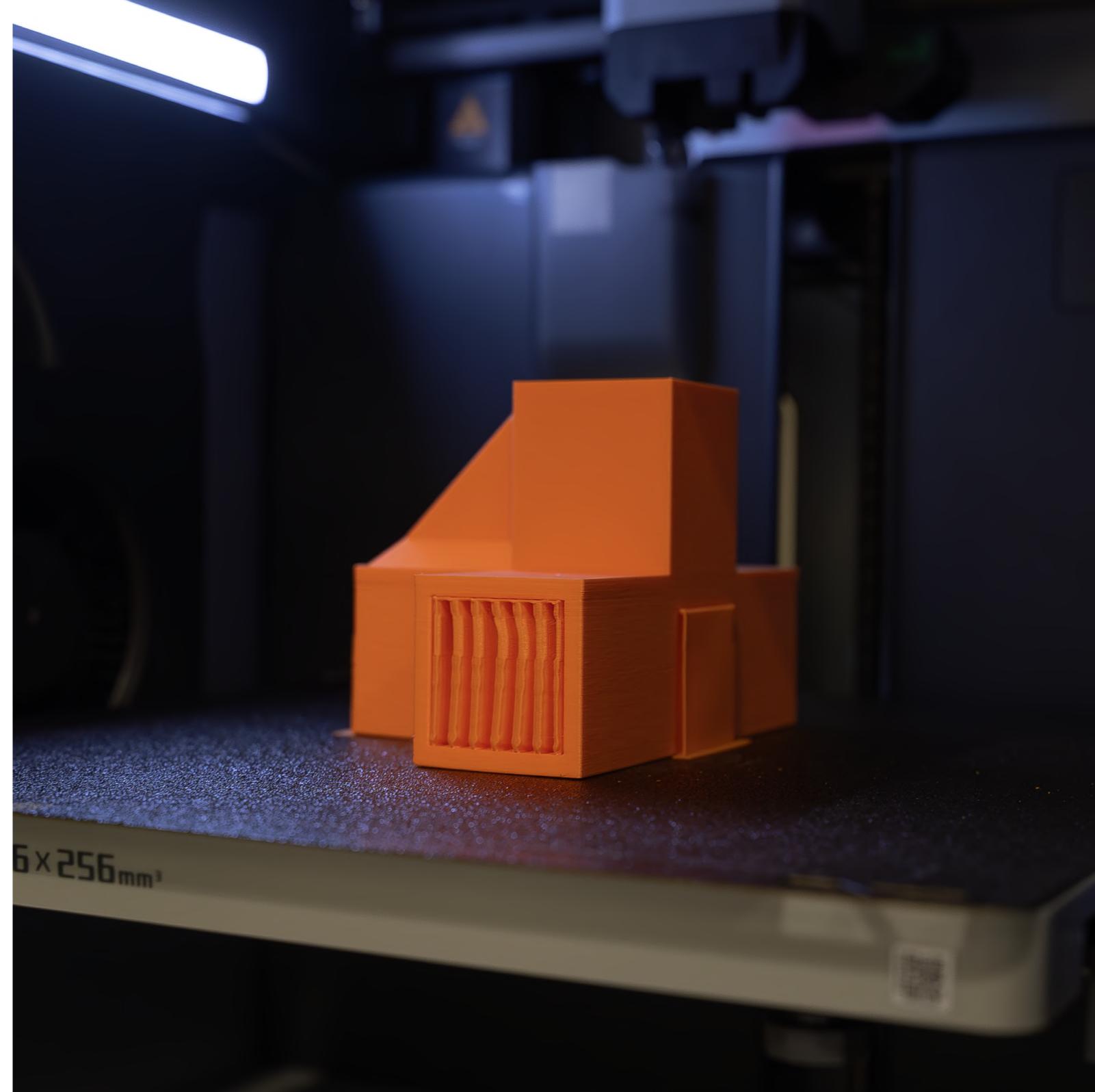


Figura 7.61
Giunto B al termine della stampa, effettuata presso il virtualLAB del Politecnico di Torino [208].

Tempi e costi di lavorazione

Un aspetto cruciale emerso dallo studio è l'importanza della valutazione dei tempi e dei costi di lavorazione. La possibilità di realizzare il giunto in autonomia, grazie alla stampa 3D domestica, apre le porte a un'autocostruzione accessibile e sostenibile, sebbene con limitazioni legate alle capacità delle macchine disponibili. D'altra parte, l'affidamento della produzione a enti terzi, come i Fab Lab, introduce variabili economiche che devono essere attentamente analizzate per garantire la sostenibilità del progetto. Di seguito verrà svolta una valutazione economica del progetto sia in un'ottica di autocostruzione e produzione in casa, sia in caso di affidamento della produzione dei giunti ad un ente terzo quale un Fab Lab.

Per questa valutazione si è preso in considerazione la costruzione di uno scaffale a 5 ripiani con l'ausilio del Giunto A, nella stessa configurazione analizzata precedentemente nel paragrafo 7.5. Al fine di semplificare il calcolo dei tempi e dei costi dei giunti, non sono state considerate le varianti dei singoli giunti (in questo caso i 4 giunti superiori della scaffalatura).

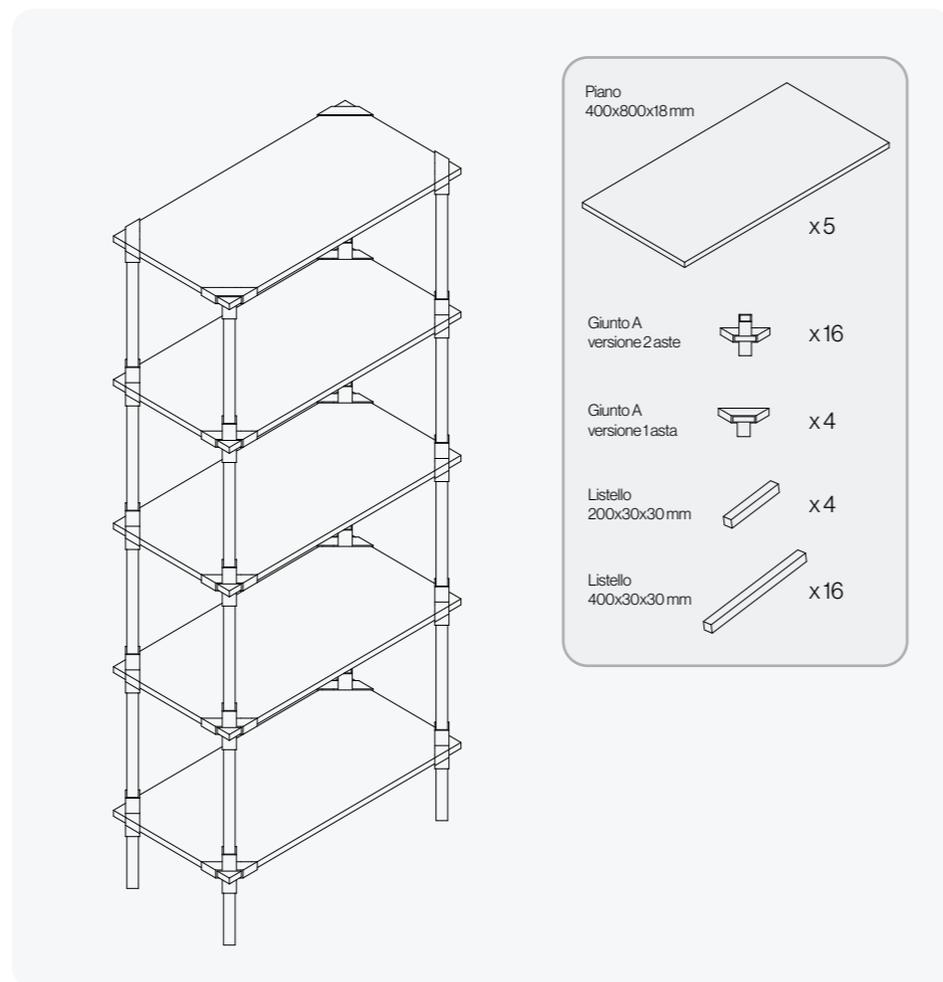


Figura 7.62 →
Rappresentazione della scaffalatura assemblata e degli elementi che la compongono.

Il costo totale dei componenti in legno si aggira intorno ai 68€¹⁰⁹, includendo l'acquisto di 5 piani e di 8 aste lunghe 1 metro, da cui si possono ricavare due aste da 400 mm e una da 200 mm, destinata ai piedi dello scaffale.

Per quanto riguarda la stampa, invece, i costi e i tempi sono stati stimati considerando l'uso di una stampante Bambu Lab X1 Carbon, con un prezzo di mercato di circa 1300€. Con questa stampante il tempo di realizzazione di un singolo giunto è di circa 2 ore e 45 minuti, con un tempo di stampa totale per tutti i 20 giunti che ammonta a 49 ore.

Nel caso si affidasse la stampa ad un Fab Lab, assumendo che quest'ultimo sia attrezzato con una stampante che offra prestazioni simili e considerando un costo orario di tale servizio di 5€/h¹¹⁰ (in cui è compresa la fornitura del materiale), il costo totale di stampa dei giunti sarebbe pari a 245€. Sommando il costo del legno, il prezzo finale dello scaffale si aggirerebbe intorno ai 300€.

Optando invece per la stampa tramite un dispositivo domestico, il costo del materiale necessario per la realizzazione di 20 giunti ammonta a circa 50€. Aggiungendo a questi il costo del consumo di corrente elettrica per tutte le 49 ore di stampa, che è di circa 3€¹¹¹.

Questi fattori portano il costo totale della scaffalatura a 108€ (escludendo ovviamente il prezzo della stampante).

Si deduce che, se si è già in possesso di una stampante 3D, la maggior parte della spesa deriva dall'acquisto del legno necessario a realizzare la scaffalatura e non dalla realizzazione dei giunti.

L'esito di questa analisi mostra che, se, in qualità di appassionati, si dispone già di una stampante, conviene assolutamente evitare di affidare la produzione dei giunti a un servizio esterno. Tuttavia, se la realizzazione della scaffalatura rappresentasse un episodio singolo di autocostruzione, converrebbe evitare di acquistare una prototipatrice e affidare il lavoro ad un servizio esterno.

109. Calcolato basandosi sui costi medi dei prodotti in vendita nei diversi negozi di bricolage, visibile nelle tabelle 7.1 (a pagina 215) e 7.2 (a pagina 217).

110. Costo orario per il servizio di stampa 3D del Fab Lab Torino.

111. Costo totale ottenuto supponendo un consumo di corrente medio di 0,07€/h.

Tabella 7.19 ↙
Resoconto delle spese necessarie per produrre la scaffalatura tramite stampante domestica privata.

Tabella 7.20 ↓
Resoconto delle spese necessarie per produrre la scaffalatura tramite servizio offerto da un Fab Lab.

Stampa autonoma a casa

Legno	68 €
Stampa dei giunti	50 €
Consumo di corrente	3 €
Costo totale	121 €

Stampa presso Fab Lab

Legno	68 €
Stampa dei giunti	245 €
Consumo di corrente	-
Costo totale	313 €

7.7 Considerazioni finali, o di partenza?

Il progetto qui presentato si configura come un esercizio di sintesi tra progettazione, funzionalità e accessibilità, mirando a rendere disponibile un sistema di giunti per il mercato open source capace di adattarsi a diverse esigenze costruttive. L'approccio adottato ha permesso di esplorare soluzioni diversificate che coniugano la praticità con una forte attenzione alla geometria strutturale, alle caratteristiche dei materiali e alla sostenibilità economica.

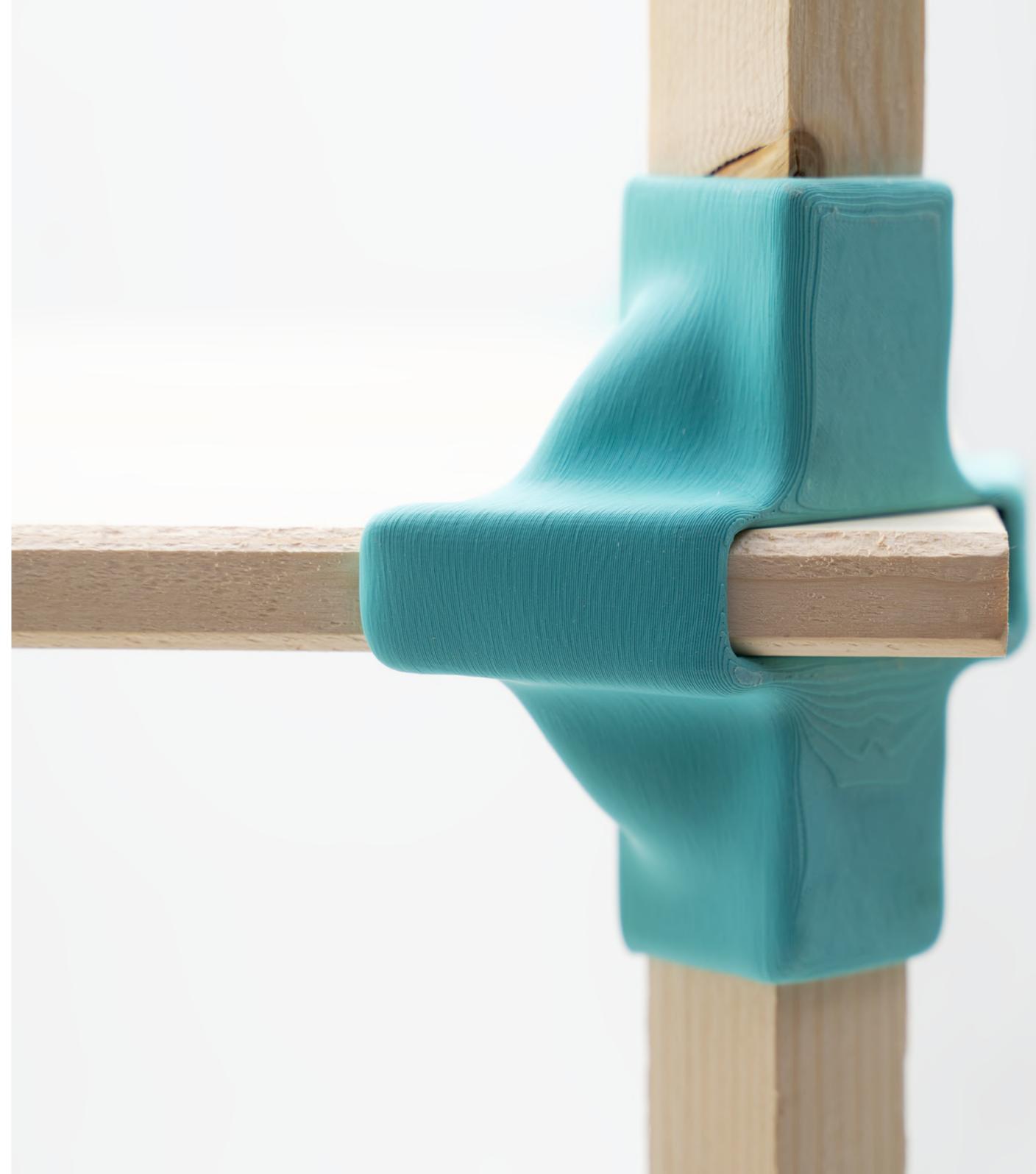


Figura 7.63
Giunto A nella sua versione generativa che presenta alcuni difetti dovuti ai limiti attuali della qualità della stampanti FDM domestiche.

Il processo

Il percorso progettuale ha evidenziato come la definizione della geometria dei ricettori¹⁰⁸, la gestione dello spessore delle sezioni e l'irrobustimento dei punti critici siano elementi imprescindibili per garantire la funzionalità del giunto.

Il risultato di questo processo sfocia in due possibili declinazioni espressive: una più geometrica, tendenzialmente elaborata dal progettista e che tende a minimizzare le connessioni da un punto di vista materico e visivo; l'altra più organica, risultato dell'impiego di un software di progettazione generativa. Le due versioni dimostrano come la progettazione tradizionale e l'uso di software avanzati possano dare vita a soluzioni diversificate, adattabili a vari gusti estetici e necessità tecniche.

108. Le parti del giunto che svolgono la funzione di contenimento delle aste e dei piani.

Convenienze e debolezze

L'esplorazione della progettazione generativa e della stampa 3D come nuovi orizzonti per democratizzare e rendere accessibile lo sviluppo di sistemi di connessione fai da te che connettano piani e aste ha portato alla luce una serie di riflessioni.

In primo luogo, è emersa la valorizzazione dell'autocostruzione, che attraverso il progetto non si limita a un'esperienza tecnica, ma si trasforma in un processo creativo e ludico. Il piacere di realizzare qualcosa con le proprie mani, di assemblare e sperimentare, non si esaurisce nella semplice produzione di un oggetto, ma diventa parte integrante del suo valore, spesso superando anche le barriere economiche imposte dalla tecnologia. A tal proposito, infatti, la prototipazione rapida si è rivelata non sempre conveniente economicamente, specie se approcciata affidando il lavoro a servizi esterni. I costi e i tempi di produzione, ancora relativamente elevati rispetto ai metodi industriali tradizionali, rendono questa tecnologia meno competitiva per una produzione ripetuta. Tuttavia, con il progresso tecnologico e la diffusione di macchine più performanti, rapide ed economiche, il panorama potrebbe cambiare radicalmente, aprendo scenari interessanti per la produzione personalizzata e decentralizzata.

Resta comunque fondamentale l'innovazione che ha apportato nel mondo dell'autoproduzione domestica, permettendo la fabbricazione di componenti in modo completamente autonomo.

Parallelamente, il generative design si conferma come una promettente frontiera progettuale da un punto di vista espressivo. Sebbene presenti alcune limitazioni su oggetti di piccole dimensioni, si distingue per il suo ruolo di co-designer al servizio del progettista. L'intervento umano rimane cruciale: è il designer che, interpretando e rielaborando i risultati generati dal software, conferisce unicità e valore al progetto, portando una visione che la sola progettazione generativa non può replicare.

Nonostante alcune sfide legate all'accessibilità di queste tecnologie, il progetto ha messo in luce il potenziale di un approccio innovativo al design dei giunti sfruttando la sinergia tra fabbricazione digitale, generative design e cultura open source. Se oggi la convenienza economica può risultare ancora incerta, il valore offerto dai giunti alla struttura, unito alla possibilità di realizzare la scaffalatura producendo le giunture stesse, rappresentano un traguardo significativo che potrebbe rivelarsi sempre più vantaggioso e diffuso nel prossimo futuro.

Bibliografia e Sitografia

Al fine di garantire una lettura chiara e fluida dellelaborato, per la redazione della bibliografia, della sitografia e dei riferimenti alle immagini è stato adottato il Vancouver Style, un sistema di citazione basato su numerazione progressiva crescente.

Capitolo 1 - INTRODUZIONE

1. R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, U. Sabino, Z. Arifin. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. Open Engineering [Internet]. 2021; Vol. 11(1), pp. 639-649. Disponibile all'indirizzo: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2021-0063/html>
2. Freepik [Internet]. Team di designer che lavora sul modello 3d. By Freepik. Disponibile all'indirizzo: https://it.freepik.com/foto-gratuito/team-di-designer-che-lavora-sul-modello-3d_25182416.htm#fromView=search&page=1&position=2&uuid=7576e814-6404-498a-b61f-6b03210a0c56&new_detail=true&query=fablab
3. Freepik [Internet]. Uomo di alto angolo che segna un legno con una matita. By Freepik. Disponibile all'indirizzo: https://it.freepik.com/foto-gratuito/uomo-di-alto-angolo-che-segna-un-legno-con-una-matita_10891674.htm#fromView=search&page=1&position=31&uid=63ea05fa-d370-4a68-96a3-0bd3403a2e15&query=diy+projects+wood
4. A. Caputo, A. Koivu. U-Jonts. A taxonomy of connections, Milano: SYNC-SYNC Editions; 2022. p. 943
5. C. Germak, S. Gabbatore. The design of the joint "by form", in DIID 66/18, Rome: Quod Libet; 2018. p.101
6. F. Denny, A. Przywara. The art of joining: designing the universal connector; Bauhaus Dessau: Taschenbuch 23 2018. p. 189
7. Modos Furniture [Internet]. DIY. Disponibile all'indirizzo:

<https://modos.io/collections/diy>

8. Formlabs [Internet]. L'abc del design generativo. Disponibile all'indirizzo: https://formlabs.com/it/blog/design-generativo/?srsltid=AfmBOo-qUyk250tHfAf_6rHHfs-W-iZz_NUu17uCyGCzcRNpu-vb0ZMkRA
9. Wikipedia [Internet]. Produzione additiva. Disponibile all'indirizzo: https://it.wikipedia.org/wiki/Produzione_additiva
10. Nervous System [Internet]. 3D printed stainless steel; 2012. Disponibile all'indirizzo: <https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/content/40-2-layer-twist-ring-stainless-steel/>
11. E. Bassi. Cos'è un fablab. E cosa non è. E perché dovrebbe interessare ai designer (no, non è per le stampanti 3D). DesignAtLarge [internet]. 13 Novembre 2019. Disponibile all'indirizzo: <https://www.designatlarge.it/fablab-cos-e/>
12. Unsplash [Internet]. Bookshelf and blue couch; 9 Settembre 2016. By Ben Garratt. Disponibile all'indirizzo: <https://unsplash.com/photos/book-filled-wooden-cabinet-gugEiYGOCLk>

Capitolo 2 - L'AUTOPRODUZIONE

13. C. Smith. Handymen, Hippies and Healing: Social Transformation through the DIY Movement (1940s to 1970s) in North America. Architectural Histories [Internet]. 19 Marzo 2014; Vol. 2(1), pp. 1-10. Disponibile all'indirizzo: <https://journal.eahn.org/article/id/7461/>

14. M. Ferraris. Documanità. Filosofia del mondo nuovo, Bari: Laterza; 2021. 417 p.
15. Protolabs [Internet]. Guida alla terminologia della stampa 3D dalla A alla Z; 22 Febbraio 2024. Disponibile all'indirizzo: <https://www.protolabs.com/it-it/risorse/blog/guida-alla-terminologia-della-stampa-3d-dalla-a-alla-z/>
16. Unsplash [Internet]. Utensili portatili assortiti in portautensili; 21 Marzo 2015. By Barn Images. Disponibile da: <https://unsplash.com/it/foto/utensili-portatili-assortiti-in-portautensili-t5YUoHW6zRo>
17. DIY-Helsinki [Internet]. Fai da te e sostenibilità. Disponibile all'indirizzo: <https://diyhelsinki.wordpress.com/diy-sustainability/>
18. B. Sève, Upcycling Wood. Reutilización creativa de la madera. Barcellona: Icaria editorial; 2018. 160 p.
19. AD Editorial Team. Upcycling Wood: Disused Materials Transformed Into Valuable And Useful Objects. ArchDaily [Internet]. 17 Maggio 2019. Disponibile all'indirizzo: <https://www.archdaily.com/916482/upcycling-wood-disused-materials-transformed-into-valuable-and-useful-objects>
20. Simco consulting [Internet]. Leroy Merlin Italia - l'implementazione di un software di gestione operativa complesso; 13 Novembre 2015. Disponibile all'indirizzo: <https://www.simcoconsulting.com/casi-e-articoli/l-implementation-di-un-software-di-gestione-operativa-complesso-il-caso-leroy-merlin-italia.html>
21. Science Museum [Internet]. A brief history of DIY, from the shed to the maker movement; 23 Aprile 2020. Disponibile all'indirizzo: <https://www.sciencemuseum.org.uk/objects-and-stories/everyday-wonders/brief-history-diy>
22. K. Christodoulou. Lidl ha aperto il suo primo negozio di utensili autonomo a Parkside. Flash [Internet]. 17 Luglio 2024. Disponibile all'indirizzo: <https://www.flash.gr/h-lidl-anoixe-to-proto-xechoristo-katastima-me-er->

[galeia-parkside-947684](https://www.galeia-parkside-947684)

23. @lidlitalia. Instagram [Internet]. [Video], Ripariamo le crepe nel legno; 31 Dicembre 2024; [0 min, 43 s]. Disponibile all'indirizzo: <https://www.instagram.com/p/DEPM-Tp1hxZb/>
24. The Farnsworth Group [Internet]. What We've Learned About DIY Home Improvement Behaviors Impacted by COVID-19; 2021. Disponibile all'indirizzo: <https://www.thefarnsworthgroup.com/blog/what-weve-learned-about-diy-home-improvement-behaviors-impacted-by-covid-19>
25. Wikipedia [Internet]. Millennial. Disponibile all'indirizzo: <https://it.wikipedia.org/wiki/Millennial>
26. Wikipedia [Internet]. Generazione X. Disponibile all'indirizzo: https://it.wikipedia.org/wiki/Generazione_X
27. Wikipedia [Internet]. Baby boomer. Disponibile all'indirizzo: https://it.wikipedia.org/wiki/Baby_boomer
28. Wikipedia [Internet]. Artigiano digitale. Disponibile all'indirizzo: https://it.wikipedia.org/wiki/Artigiano_digitale
29. E. Ferroni. Le fabbriche del futuro (in 3D). Treccani [Internet]. 10 Maggio 2013. Disponibile all'indirizzo: https://www.treccani.it/magazine/atlanter/cultura/Le_fabbriche_del_futuro.html
30. Freepik [Internet]. Progettista che usa una stampante 3D. By Freepik. Disponibile all'indirizzo: https://it.freepik.com/foto-gratuito/progettista-che-usa-una-stampante-3d_94944722.htm
31. Freepik [Internet]. Progettista utilizzando una stampante 3d. By Freepik. Disponibile all'indirizzo: https://it.freepik.com/foto-gratuito/progettista-utilizzando-una-stampante-3d_78922795.htm#fromView=keyword&page=1&position=0&uid=f5492194-8e85-43ff-92d8-df2ef604d432&new_detail=true&query=Filamento+Stampante+3d
32. Treccani [Internet]. Stereolitografia. Disponibile all'indi-

rizzo: <https://www.treccani.it/vocabolario/stereolitografia/>

33. 3D Systems [Internet]. Sinterizzazione laser selettiva. Disponibile all'indirizzo: <https://it.3dsystems.com/selective-laser-sintering>
34. Opensource [Internet]. The open source way. Disponibile all'indirizzo: <https://opensource.com/open-source-way>
35. Wikipedia [Internet]. STL (file format). Disponibile all'indirizzo: [https://it.wikipedia.org/wiki/STL_\(formato_di_file\)](https://it.wikipedia.org/wiki/STL_(formato_di_file))
36. Thingiverse [Internet]. Welcome to Thingiverse. Digital Designs for Physical Objects. Disponibile all'indirizzo: <https://www.thingiverse.com/>
37. Hello Project [Internet]. 5 Common Challenges of DIY Projects You Should Avoid; 20 Dicembre 2024. Disponibile all'indirizzo: <https://www.helloprojectusa.com/home-remodeling/5-common-challenges-of-diy-projects-you-should-avoid/>
38. Wikipedia [Internet]. Dispositivi di protezione individuale. Disponibile all'indirizzo: https://it.wikipedia.org/wiki/Dispositivi_di_protezione_individuale
39. Pixabay [Internet]. Immagine di Falegname, Mani, Cornice di legno; 3 Febbraio 2021. By joeheath92. Disponibile all'indirizzo: <https://unsplash.com/it/foto/una-persona-seduta-sul-pavimento-gphz4u1ZKto>
40. Unsplash [Internet]. Bastoncini di legno marroni e neri; 31 Agosto 2021. By Brian Wangenheim. Disponibile all'indirizzo: https://unsplash.com/it/foto/bastoncini-di-legno-marroni-e-neri-gacX_Xzhlc5

Capitolo 3 - IL GIUNTO PER FORMA

41. C. Germak. KWD Lezione 6_Giunto per forma. [PowerPoint]. 01UABLH Keywords design. Politecnico di Torino. 2021-2022.
42. 1stDibs [Internet]. Set di dieci sedie da pranzo S11 di Pier-

re Chapo. Disponibile all'indirizzo: https://www.1stdibs.com/it/arredi/tavoli/set-sala-da-pranzo/set-di-dieci-sedie-da-pranzo-s11-di-pierre-chapo-con-tavolo-da-pranzo-aban/id_f_37770752/#zoomModalOpen

43. Treccani [Internet]. Colómbio, Joe. Disponibile all'indirizzo: <https://www.treccani.it/enciclopedia/joe-colombo/>
44. Stefano Pasotti - Industrial Design. Youtube [Internet]. [Video], La poltrona Tube Chair progettata da Joe Colombo per @cappellinichannel; 6 Aprile 2022; [4 min, 57 s]. Disponibile all'indirizzo: <https://www.youtube.com/watch?v=9l0dGKKth8E>
45. M. Fois. Metodologia e didattica per un Design dei Sistemi complessi: l'approccio dell'ISIA Roma Design. DiCultHer [Internet]. 2022; Vol. 2(7), pp. 40-51. Disponibile all'indirizzo: <https://www.diculther.it/rivista/culture-digitali-anno-2-numero-7/>
46. C. Lubchenko. 7 Things You Need to Know About Japanese Joinery. Japan Objects [Internet]. 20 Agosto 2021. Disponibile all'indirizzo: <https://japanobjects.com/features/japanese-joinery>
47. Solid [Internet]. Cos'è il sashimono, l'arte giapponese degli incastri lignei. Disponibile all'indirizzo: <https://www.solidrenner.com/cose-il-sashimono-larte-giapponese-degli-incastri-lignei/>
48. Wikipedia [Internet]. Shintoismo. Disponibile all'indirizzo: <https://it.wikipedia.org/wiki/Shintoismo>
49. Japan Woodcraft Association [Internet]. Japanese Wood Joinery. Disponibile all'indirizzo: <https://japanwoodcraftassociation.com/traditions/techniques/sashimono/>
50. @dylaniwakuni. Instagram [Internet]. Making improvised joineries to achieve the desired functions. By cutting the necessary shapes, the form of the joinery naturally forms. The wedged tenon pulls and locks the joint as well as the material, serving two purposes in one move. 神 必要な機能を求めたら自然に現れた木組みの形。ホゾに楔を入れることで、継手も桁(横

架材)も引っ張り、固定する。一つで二つの機能を果たす。 [Post]; 28 Agosto 2024. Disponibile all'indirizzo: https://www.instagram.com/p/C_NszUHSGVF/?utm_source=ig_web_copy_link&igsh=MzRIODBiNWFIZA==

51. Treccani [Internet]. Massa. Disponibile all'indirizzo: <https://www.treccani.it/vocabolario/massa/>
52. D. Dardi. Congiunzioni. Interni Magazine [Internet]. 19 Dicembre 2019. Disponibile all'indirizzo: <https://www.internimagazine.it/design/progetti/congiunzioni/>
53. Agapecasa [Internet]. 1971 Eros. Disponibile all'indirizzo: <https://www.agapecasa.it/famiglie/eros>
54. Formagramma [Internet]. Carati : Mario Alessiani; 19 Gennaio 2016. Disponibile all'indirizzo: <https://www.formagramma.com/design/23859/carati-mario-alessiani/>
55. Treccani [Internet]. Attrito. Disponibile all'indirizzo: [https://www.treccani.it/enciclopedia/attrito_res-347a0046-8b74-11dc-8e9d-0016357eee51_\(Enciclopedia-Italiana\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/attrito_res-347a0046-8b74-11dc-8e9d-0016357eee51_(Enciclopedia-Italiana)/)
56. Latericius [Internet]. An introduction to LEGO® alternative brands and alt bricks; 26 Giugno 2024. Disponibile all'indirizzo: <https://latericius.com/en-eu/blogs/blog/what-are-alt-bricks-lego-alternatives>
57. M. Merano, P. Giubilato. Lezione 8. [PowerPoint]. INP8083376 Fisica 1. Università degli Studi di Padova. 2022-2023. Disponibile all'indirizzo: https://stem.elearning.unipd.it/pluginfile.php/487431/mod_resource/content/1/Lezione%208.pdf#:~:text=Se%20un%20corpo%20esercita%20una,da%20essa%20nella%20stessa%20misura
58. Hiroyuki Ikeuchi Studio [Internet]. Tensile. Disponibile all'indirizzo: <http://hiroyuki-ikeuchi.com/en/2017/07/20/tensile/>
59. Design Soil [Internet]. Lagrangian Point. Disponibile all'indirizzo: <http://www.designsoil.jp/project/lagrangian-point-en.html>

60. Wikipedia [Internet]. Comportamento emergente. Disponibile all'indirizzo: https://it.wikipedia.org/wiki/Comportamento_emergente

61. P. Greco. La ricerca della complessità: proprietà emergenti. Scienza in rete [Internet]. 22 Aprile 2013. Disponibile all'indirizzo: <https://www.scienzainrete.it/articolo/ricerca-della-complessita%C3%A0-propriet%C3%A0-emergenti/pietro-greco/2013-04-22>
62. A Need for "Systemics". In: Systemics of Incompleteness and Quasi-Systems. Cham: Springer Nature; 2019. pp. 247-256
63. Kodai Iwamoto [Internet]. Half-Throttle, shelf. Disponibile all'indirizzo: <https://www.kohdaiiwamoto.com/half-throttle>
64. Flos [Internet]. I 50 anni di Parentesi. Disponibile all'indirizzo: <https://professional.flos.com/it/global/stories/stories-parentesi-at-50/>
65. Quittenbaum [Internet]. 'Tube chair', 1969; 21 Febbraio 2017. Disponibile all'indirizzo: <https://www.quittenbaum.de/en/auktionen/design/131A/joe-colomboflexform-meda-mailand-tube-chair-1969-89670/>
66. Studio Minale-Maeda [Internet]. Keystones. Disponibile all'indirizzo: <https://www.minale-maeda.com/filter/PROJECTS/KEYSTONES>
67. FIGURA 3.28: A. L. Alperovich-O'Brien. Minale-Maeda's 3D Printed Connector Can be Downloaded to Make DIY Furniture. Inhabitat [Internet]. 19 Aprile 2014. Disponibile all'indirizzo: <https://inhabitat.com/minale-maedas-3d-printed-connector-can-be-downloaded-to-make-diy-furniture/studio-minale-maeda-3d-printed-furniture-connector-keystones-6/>
68. S. Sheth. A Quirky Corky Stool. Yanko Design [Internet]. 28 Settembre 2016 Disponibile all'indirizzo: <https://www.yankodesign.com/2016/09/28/a-quirky-corky-stool/>
69. Nutcreatives [Internet]. Geometry and 3d printing in an open source project. Disponibile all'indirizzo: <https://>

www.nutcreatives.com/yconstructiongame

ring-work-3d-printing-148623227.html

Disponibile all'indirizzo: <http://blog.reprap.org/2008/02/darwinadrian.html>

torientationandprice/

70. ACM SIGCHI. Youtube [Internet]. [Video], Digital Joinery For Hybrid Carpentry; 7 Aprile 2018; [0 min, 30 s]. Disponibile all'indirizzo: https://www.youtube.com/watch?v=y90x8yuQx_8&ab_channel=ACMSIGCHI

79. Formlabs [Internet]. Guida alla prototipazione rapida per lo sviluppo di prodotto. Disponibile all'indirizzo: <https://formlabs.com/it/blog/la-guida-definitiva-alla-prototipazione-rapida-per-lo-sviluppo-di-nuovi-prodotti/>

89. C. Lalwani. History of 3D Printing Explained. Phrozen [Internet]. 26 Febbraio 2021. Disponibile all'indirizzo: <https://phrozen3d.com/en-hk/blogs/resin-3d-printing-latest-news/history-of-3d-printing-explained>

98. M. Tyson. Starters guide to 3D Printing: Orientation. 3D Printing Solution [Internet]. 5 Settembre 2018. Disponibile all'indirizzo: <https://www.3dprintingsolutions.com.au/News/Australia/starters-guide-to-3d-printing-orientation>

71. A R Zoran [Internet]. Digital Joinery For Hybrid Carpentry; 2 Febbraio 2018. Disponibile all'indirizzo: <https://www.amitzoran.com/post/digital-joinery-for-hybrid-carpentry>

80. Formlabs. YouTube [Internet]. [Video], Prototipazione rapida con la stampa 3D; 9 Settembre 2021; [5 min, 12 s]. Disponibile all'indirizzo: <https://youtu.be/-TDn25K-Jh4?si=BWIB8pxgFp59PdLW>

90. P. Keane. What is Design for Additive Manufacturing?. Engineers Rule [Internet]. 14 Giugno 2016. Disponibile all'indirizzo: <https://www.engineersrule.com/design-additive-manufacturing/>

99. AMFG [Internet]. Post-Processing for Industrial 3D Printing: The Road Towards Automation; 11 Dicembre 2018. Disponibile all'indirizzo: <https://amfg.ai/2018/12/11/post-processing-industrial-3d-printing-road-towards-automation/>

72. Domus [Internet]. Ollé Gellért, 3D printed joints. Disponibile all'indirizzo: https://www.domusweb.it/it/notizie/2015/08/01/olle_gellert_3d_printed_joints.html

81. Additive x [Internet]. The History of 3D Printing; 2 Agosto 2023. Disponibile all'indirizzo: <https://additive-x.com/blog/the-history-of-3d-printing-additive-manufacturing>

91. L. Brandoli. Giappone, realizzata casa stampata in 3D che costa come una automobile. Domus [Internet]. 4 Settembre 2023. Disponibile all'indirizzo: <https://www.domusweb.it/it/notizie/gallery/2023/09/04/in-giappone--stata-realizzata-una-casa-stampata-in-3d-che-costa-come-una-macchina.html>

100. Simplify3D [Internet]. PVA. Disponibile all'indirizzo: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/pva/>

73. DesignLibero [Internet]. DESIGN 3.0. Disponibile all'indirizzo: <https://www.designlibero.com/portfolio/design-3-0-hybrid-production-xxi-t/>

82. Atsuko Tsuji. Stampa 3D e Università di Nagoya. Meidai Watch [Internet]. 28 Giugno 2019. Disponibile all'indirizzo: <https://www.meidaiwatch.iech.provost.nagoya-u.ac.jp/en/2019/06/3d.html>

92. I. Guicciardini. Introduction to Additive Manufacturing: definition, how it works, applications. Roboze [Internet]. Disponibile all'indirizzo: <https://www.roboze.com/en/resources/introduction-to-additive-manufacturing-definition-how-it-works-applications.html>

101. B. Redwood, F. Schöffner, B. Garret. The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications. Amsterdam: 3D Hubs B.V.; 2017. 304 p.

74. Oonidus [Internet]. Design 3.0 / ICOSA by DesignLibero. Disponibile all'indirizzo: <https://oonidus.gumroad.com/l/bwXuX>

83. Disponibile all'indirizzo: <https://webthesis.biblio.polito.it/23938/1/tesi.pdf>

75. Vera Shur. Instructables [Internet]. + Shelf [Progetto]. Disponibile all'indirizzo: <https://www.instructables.com/-Shelf/>

84. National Inventors Hall of Fame [Internet]. Charles Hull. Disponibile all'indirizzo: <https://www.invent.org/inductees/charles-hull>

93. L. Iuliano. Introduzione all'AM. [PowerPoint]. I nuovi processi manifatturieri basati sull'additive manufacturing - Intraprendenti. Politecnico di Torino. 2022-2023.

103. Wikipedia [Internet]. Sabbatura (tecnologia). Disponibile all'indirizzo: [https://it.wikipedia.org/wiki/Sabbatura_\(tecnologia\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Sabbatura_(tecnologia))

Capitolo 4 - L'ADDITIVE MANUFACTURING

76. M. Vitale, M. Cotteleer, J. Holdowsky. An Introduction to Additive Manufacturing. Defense AT&L Magazine [Internet]. 4 Novembre 2016; Vol. 45(6), pp. 6-13. Disponibile all'indirizzo: https://www.dau.edu/sites/default/files/Migrate/DATLFiles/Nov-Dec2016/DATL%20Nov_Dec2016.pdf

85. Google Arts and Culture [Internet]. Stereolithography Machine, Model SLA-1, 1987. By The Henry Ford. Disponibile all'indirizzo: <https://g.co/arts/8L-C4woyH7mrUUQ977>

77. Protolabs Network [Internet]. 3D Printing. Disponibile all'indirizzo: <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>

86. Business Wire [Internet]. Stratasys Chairman Scott Crump to Be Inducted into the Minnesota Inventors Hall of Fame; 2 Maggio 2014. Disponibile all'indirizzo: <https://www.businesswire.com/news/home/20140502005882/en/Stratasys-Chairman-Scott-Crump-to-Be-Inducted-into-the-Minnesota-Inventors-Hall-of-Fame>

78. Depositphotos [Internet]. Electronic three dimensional plastic printer during work, 3D, printing. By Alex011973. Disponibile all'indirizzo: <https://depositphotos.com/photo/electronic-three-dimensional-plastic-printer-du>

87. EurekaAlert! [Internet]. WFIRM Gyroid Shaped Construct. By WFIRM. Disponibile all'indirizzo: <https://www.eureka-alert.org/multimedia/985186>

94. Protolabs Network [Internet]. What is CAD modeling? Comparing design software for 3D printing. Disponibile all'indirizzo: <https://www.hubs.com/knowledge-base/3d-modeling-cad-software/>

104. S.D.P. [Internet]. Prototipazione rapida. Disponibile all'indirizzo: <https://www.sdpsnc.it/>

95. Wikipedia [Internet]. Normale (superficie). Disponibile all'indirizzo: [https://it.wikipedia.org/wiki/Normale_\(superficie\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Normale_(superficie))

105. Wikipedia [Internet]. Trattamento termico. Disponibile all'indirizzo: https://it.wikipedia.org/wiki/Trattamento_termico

96. 3D Company [Internet]. Come creare file STL di qualità per la stampa 3D; 7 Luglio 2021. Disponibile all'indirizzo: <https://www.3dcompany.it/file-stl-per-la-stampa-3d/>

106. Protolabs Network [Internet]. Additive Manufacturing Technologies. Disponibile all'indirizzo: <https://www.hubs.com/get/am-technologies/>

107. A. Salmi. 09 - Fabbricazione additiva - Tecniche polimeri (solidi e polveri). [PowerPoint]. 03NBZLH Design per l'industrializzazione. Politecnico di Torino. 2022-2023.

108. Simplify3D [Internet]. PLA. Disponibile all'indirizzo: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/pla/>
109. Simplify3D [Internet]. Filament Properties Table. Disponibile all'indirizzo: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/?highlight=pla>
110. Protolabs [Internet]. What is Design for Additive Manufacturing? Disponibile all'indirizzo: <https://www.protolabs.com/resources/guides-and-trend-reports/what-is-design-for-additive-manufacturing/>
111. Freepik [Internet]. Stile di vita del designer che usa una stampante 3D. By Freepik. Disponibile all'indirizzo: https://it.freepik.com/foto-gratuito/stile-di-vita-del-designer-che-usa-una-stampante-3d_96363631.htm#fromView=search&page=2&position=25&uid=5f2f855f-a280-4c86-849a-27f9a72790a3&new_detail=true&query=3d+printer
112. A. Toscano. Manifattura Additiva Vs Manifattura tradizionale: costi e vantaggi della tecnologia di stampa 3D. Roboze [Internet]. Disponibile all'indirizzo: <https://www.roboze.com/it/risorse/manifattura-additiva-vs-manifattura-tradizionale-costi-e-vantaggi-della-tecnologia-di-stampa-3d.html>
113. A. Toscano. 8 motivi per cui dovresti produrre in PEEK con la stampa 3D. Roboze [Internet]. Disponibile all'indirizzo: <https://www.roboze.com/it/risorse/8-motivi-per-cui-dovresti-produrre-in-peek-con-la-stampa-3d.html>
114. Thenextfactory [Internet]. Quando conviene l'additivo?; 19 Giugno 2017. Disponibile all'indirizzo: <https://www.thenextfactory.it/quando-conviene-ladditivo/>
115. Treccani [Internet]. Sottosquadri. Disponibile all'indirizzo: <https://www.treccani.it/vocabolario/sottosquadro/>
116. L. Montanaro. 03A_Design_lezione 3A_audio. [PowerPoint]. 01VLKLNH Materiali e loro tecnologie applicati al design. Politecnico di Torino. 2022-2023.

117. Protolabs [Internet]. L'orientamento delle parti per la stampa 3D: come influisce sulla resistenza, la precisione e sulle finiture superficiali; 8 Febbraio 2024. Disponibile all'indirizzo: <https://www.protolabs.com/it-it/risorse/blog/considerazioni-sull-orientamento-dei-pezzi-stampati-in-3d/>
118. R. Jones, P. Haufe, E. Sells, P. Iravani, V. Olliver, C. Palmer and A. Bowyer. RepRap - The Replicating Rapid Prototyper. Robotica [Internet]. 2011; Vol. 29, pp. 177-191. Disponibile all'indirizzo: <https://reprap.org/mediawiki/images/d/da/Jones-et-al-paper.pdf>
119. Printables [Internet]. 3D Benchy; 23 Maggio 2019. Disponibile all'indirizzo: <https://www.printables.com/model/3161-3d-benchy>
120. Unsplash [Internet]. Un paio di barche blu sedute in cima a un tavolo; 12 Febbraio 2022. By Megan Lee. Disponibile all'indirizzo: <https://unsplash.com/it/foto/un-paio-di-barche-blu-sedute-in-cima-a-un-tavolo-3L8E2AGQTZ0>
121. Freepik [Internet]. Progettista utilizzando una stampante 3d. By Freepik. Disponibile all'indirizzo: <https://it.freepik.com/serie/78922830/2>
122. 3D Print [Internet]. Chinese Metal 3D Printing Companies Make a Splash RAPID + TCT 2023. Disponibile all'indirizzo: <https://3dprint.com/300176/chinese-metal-3d-printing-companies-make-a-splash-rapid-tct-2023/amp/>
123. AMFG [Internet]. 10 of the Biggest Challenges in Scaling Additive Manufacturing for Production in 2020 [Expert Roundup]; 8 Ottobre 2019. Disponibile all'indirizzo: <https://amfg.ai/2019/10/08/10-of-the-biggest-challenges-in-scaling-additive-manufacturing-for-production-expert-roundup/>
124. Incus [Internet]. Incus Partners with NanoProbe Group at Yale University to Explore Auxetic Structures; 1 Febbraio 2024. Disponibile all'indirizzo: <https://www.incus3d.com/articles/incus-partners-with-nanoprobe-group-at-yale-university-to-explore-auxetic-structures/>

Capitolo 5 - IL GENERATIVE DESIGN

125. Engineering Product Design [Internet]. Generative Design (GD); 6 Febbraio 2023. Disponibile all'indirizzo: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/generative-design/>
126. Treccani [Internet]. Machine learning. Disponibile all'indirizzo: [https://www.treccani.it/vocabolario/machine-learning_\(Neologismi\)/](https://www.treccani.it/vocabolario/machine-learning_(Neologismi)/)
127. C. Langella, C. Santulli. Processi di crescita biologica e Design parametrico. MD Journal [Internet]. 2017; Vol. 3, pp. 14-27. Disponibile all'indirizzo: <https://mdj.materialdesign.it/index.php/mdj/article/view/85>
128. M. Anderson. What Is Generative Design in Construction?. Milwaukee Tool [Internet]. 8 Dicembre 2022. Disponibile all'indirizzo: <https://onekeyresources.milwaukeetool.com/en/generative-design>
129. Pixabay [Internet]. Shell, Conch, Conch shell image; 11 Aprile 2017. By ambquinn. Disponibile all'indirizzo: <https://pixabay.com/photos/shell-conch-conch-shell-nature-2218491/>
130. Filippo Nasseti [Internet]. Superabundance Mask. Disponibile all'indirizzo: <https://filipponassetti.com/superabundance-mask>
131. C. Langella, D. Scodeller, V. Dal Buono. Design parametrico e generativo: nuove prospettive di ricerca. MD Journal [Internet]. 2017; Vol. 3, pp. 6-13. Disponibile all'indirizzo: <https://mdj.materialdesign.it/index.php/mdj/article/view/84>
132. A. Sdegno. Computer Aided Architecture: origini e sviluppo. Computer Aided Architecture: origins and development. DISEGNARECON [Internet]. 2016; Vol. 9, pp. 46-57. Disponibile all'indirizzo: <https://disegnarecon.univaq.it/ojs/index.php/disegnarecon/article/view/158>
133. Isicad [Internet]. How the Inventor of CATIA Became the Founder of Dassault Systèmes; 3 Marzo 2021. Disponibile all'indirizzo: <https://isicad.net/articles.php?arti->

cle_num=21729

134. Wikipedia [Internet]. Grasshopper 3D. Disponibile all'indirizzo: https://en.wikipedia.org/wiki/Grasshopper_3D
135. Engineering [Internet]. Autodesk Fusion 360: The future of CAD, pt. 1; 29 Novembre 2012. Disponibile all'indirizzo: <https://www.engineering.com/autodesk-fusion-360-the-future-of-cad-part-1/>
136. Google books [Internet]. Parametricism 2.0: Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century. Disponibile all'indirizzo: https://books.google.it/books?id=qxORCgAAQBAJ&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
137. S. Dhurjada, A. Shaikhb, S. Chinchankar. Generative design for additive manufacturing (G-DFAM): An explorative study of aerospace brackets. ResearchGate [Internet]. 22 Maggio 2023. Disponibile all'indirizzo: https://www.researchgate.net/publication/370975072_Generative_design_for_additive_manufacturing_G-DFAM_An_explorative_study_of_aerospace_brackets
138. Materialise [Internet]. Aerospaziale. Disponibile all'indirizzo: <https://www.materialise.com/it/settori/aerospaziale>
139. C. Riddell. The difference between generative design and parametric design. Graitec [Internet]. Disponibile all'indirizzo: <https://asti.com/blog/the-difference-between-generative-design-and-parametric-design/>
140. @ilmar3designs. Pinterest [Internet]. [Post]. Disponibile all'indirizzo: <https://in.pinterest.com/pin/2885187256476878/>
141. Seeklogo [Internet]. Autodesk Fusion 360 Logo PNG Vector. Disponibile all'indirizzo: <https://seeklogo.com/vector-logo/482400/autodesk-fusion-360>
142. PTC [Internet]. Parent Brand. Disponibile all'indirizzo: <https://www.ptc.com/en/brand-guide/logos/creo>
143. nTop [Internet]. Accelerate product development with

- computational design. Disponibile all'indirizzo: <https://www.ntop.com/>
144. Worldvectorlogo [Internet]. Download NX CAD CAM vector (SVG) logo. Disponibile all'indirizzo: <https://worldvectorlogo.com/logo/nx-cad-cam>
145. Nexus [Internet]. MSC Apex. Disponibile all'indirizzo: <https://nexus.hexagon.com/home/product/msc-apex/>
146. John Mauriello [Internet]. The Coral Lighting Collection. Disponibile all'indirizzo: <https://www.studioello.com/coral>
147. A. Lesiv. Reshaping the Future of Manufacturing. Contrary [Internet]. 5 Ottobre 2023. Disponibile all'indirizzo: <https://www.contrary.com/foundations-and-frontiers/additive-manufacturing>
148. All Design Lab [Internet]. Hitëkw Tennis Racket. Disponibile all'indirizzo: <https://alldesignlab.co/hitekwl/>
149. Van Rysel [Internet]. PNPL 3.0. Disponibile all'indirizzo: <https://www.vanryselcycling.com/pnpl-en>
150. Nervous System Blog [Internet]. A tale of 7 kinematics dresses: a red dress, a museum acquisition, + 5 more; 9 Ottobre 2015. Disponibile all'indirizzo: <https://n-e-r-v-o-u-s.com/blog/?p=6915>
151. Engineering [Internet]. Autodesk Teams up with AWS for Free Cloud Computing; 1 Luglio 2018. Disponibile all'indirizzo: <https://www.engineering.com/autodesk-teams-up-with-aws-for-free-cloud-computing/>
152. Janne Kytтанen [Internet]. Sofa So Good - 2014. Disponibile all'indirizzo: <https://www.jannekyttanen.com/case-studies/sofa-so-good>
153. Joris Laarman Lab [Internet]. Arm Chair (2007). Disponibile all'indirizzo: <https://www.jorislaarman.com/work/arm-chair/>
154. Nervous System [Internet]. Flora Collar. Disponibile all'indirizzo: <https://n-e-r-v-o-u-s.com/shop/product.php?code=274>
155. Red Dot [Internet]. Print 001XT. Disponibile all'indirizzo: <https://www.red-dot.org/de/project/print-001xt-60302>
156. Parametric House [Internet]. Eco Wall. Disponibile all'indirizzo: <https://parametrichouse.com/eco-wall/>
- Capitolo 6 - LE SCAFFALATURE**
157. Treccani [Internet]. Stipo. Disponibile all'indirizzo: <https://www.treccani.it/vocabolario/stipo/>
158. Treccani [Internet]. Scaffale. Disponibile all'indirizzo: <https://www.treccani.it/vocabolario/scaffale/>
159. C. Terzi. Scaffale. Teknoring [Internet]. 3 Gennaio 2012. Disponibile all'indirizzo: <https://www.teknoring.com/wiki-tecnica/progettazione-architettura/scaffale/>
160. IKEA [Internet]. Estantes y repisas. Disponibile all'indirizzo: <https://www.ikea.com/cl/es/cat/estantes-repisas-st002/>
161. Freepik [Internet]. Interior designer che organizza decorazioni in casa. By Freepik. Disponibile all'indirizzo: https://it.freepik.com/foto-gratuito/interior-designer-che-organizza-decorazioni-in-casa_40872575.htm#fromView=search&page=1&position=4&uuiid=b-6dacb58-a0b4-4ae9-96d5-b7904ff97b77&new_detail=true&query=shelf+take
162. Brundarte [Internet]. Il Museo archeologico "F. Ribezzo" racconta; 16 Gennaio 2020. Disponibile all'indirizzo: <https://www.brundarte.it/museo-archeologico-f-ribezzo-racconta/>
163. Freepik [Internet]. Tazza di vetro in mani femminili sullo sfondo di una credenza con bellissimi piatti vintage. By Freepik. Disponibile all'indirizzo: https://it.freepik.com/foto-gratuito/tazza-di-vetro-in-mani-femminili-sullo-sfondo-di-una-credenza-con-bellissimi-piatti-vintage_20128662.htm#fromView=search&page=1&position=3&uuiid=34f239a3-b771-4f02-9c9b-74ce0029b60d&new_detail=true&query=glass+shelf+expose+relics
164. Michele Volpi Studio Interior Design [Internet]. L'evoluzione della libreria nel design degli interni; 11 Maggio 2024. Disponibile all'indirizzo: <https://www.michelevolpi.it/evoluzione-della-libreria-nellinterior-design-degli-interni/>
165. Wikipedia [Internet]. Yingzao Fashi. Disponibile all'indirizzo: https://en.wikipedia.org/wiki/Yingzao_Fashi
166. Wikipedia [Internet]. Dinastia Song. Disponibile all'indirizzo: https://it.wikipedia.org/wiki/Dinastia_Song
167. Wikipedia [Internet]. Bookcase. Disponibile all'indirizzo: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bookcase>
168. Wikipedia [Internet]. Lucio Anneo Seneca. Disponibile all'indirizzo: https://it.wikipedia.org/wiki/Lucio_Aneeo_Seneca
169. Libriantichionline [Internet]. Seneca - Non giustifico la biblioteca intesa come ornamento per abbellire le pareti. Disponibile all'indirizzo: https://www.libriantichionline.com/bibliofilia/seneca_biblioteca_ornamento
170. Wikipedia [Internet]. Stampa a caratteri mobili. Disponibile all'indirizzo: https://it.wikipedia.org/wiki/Stampa_a_caratteri_mobili
171. D. Dardi, V. Pasca. Manuale di storia del design. Milano: Silvana Editoriale; 2019. 280 p.
172. The Met [Internet]. The Backgammon Players. Disponibile all'indirizzo: <https://www.metmuseum.org/toah/works-of-art/26.54>
173. Thonet [Internet]. B 22 a. Disponibile all'indirizzo: <https://www.thonet.de/en/all-products/detail/b-22a>
174. Cassina [Internet]. Modular Freeform. Disponibile all'indirizzo: <https://www.cassina.com/ch/it/prodotti/nuage.html>
175. C. Corbetta. Icone del design: gli scaffali String System. La gatta sul tetto [Internet]. 7 Novembre 2017. Disponibile all'indirizzo: <https://www.lagattasultettomilano.com/icone-del-design-scaffali-string-system/>
176. Archivio Vico Magistretti [Internet]. Designing convertibility: sparingness, lightness and minimum floor space. Disponibile all'indirizzo: <https://archivio.vicomagistretti.it/magistretti/percorso/IT-FVM-CMS001-000028?lang=en>
177. Memphis Milano [Internet]. Carlton. Disponibile all'indirizzo: <https://shop.memphis.it/product/carlton/>
178. Scaffalando [Internet]. Scaffalatura, la storia. Disponibile all'indirizzo: <https://www.scaffalando.com/scaffalatura-la-storia/>
179. Emaf [Internet]. Inter-locking metal industrial racking - DONATELLO model EM36-250 with five levels. Disponibile all'indirizzo: <https://emaf.it/en/prodotto/inter-locking-metal-industrial-racking-donatello-model-em36-250-with-five-levels/>
180. Gruppo di Cosimo [Internet]. Scaffalature: la sfida? Abbassare il costo /pallet stoccato e movimentato. Disponibile all'indirizzo: <https://www.gruppodicosimo.com/scaffalature-la-sfida-abbassare-il-coste-e-pallet-stoccato-e-movimentato/>
181. Freepik [Internet]. Worker sets the shelf for closet cabinet. By Freepik. Disponibile all'indirizzo: https://www.freepik.com/premium-photo/worker-sets-shelf-closet-cabinet_5663217.htm
182. Tojo [Internet]. Tojo solo - rack. Disponibile all'indirizzo: <https://www.tojo.de/en/products/tojo-solo-rack>
183. Archiproducts [Internet]. Hypóstila. Disponibile all'indirizzo: https://www.archiproducts.com/it/prodotti/bd-barcelona-design/libreria-a-parete-in-alluminio-hypostila_27745
184. KEIGIO [Internet]. SHELF. Disponibile all'indirizzo: <https://www.keigio.com/modular-shelf>
185. Archiproducts [Internet]. KEIGIO® SHELF 9 frames 2+4+2+1. Disponibile all'indirizzo: <https://www.archiproducts.com/it/prodotti/keigio-shef-9-frames-2-4-2-1/>

ducts.com/it/prodotti/keigio/libreria-a-giorno-autoportante-modulare-keigio-shelf-9-frames-2-4-2-1_482782

186. Disponibile all'indirizzo: <https://it.pinterest.com/pin/554435404098182465/>

187. Archivi Triennale [Internet]. Enzo Mari, il dibattito sul Museo del Design Italiano e il progetto curatoriale collettivo. Disponibile all'indirizzo: <https://archivi.triennale.org/archive/magazine/enzo-mari-e-il-museo-del-design-italiano>

188. Kartell [Internet]. Polvara. Disponibile all'indirizzo: <https://www.kartell.com/it/it/kit/shop/product/polvara/kar0476703>

189. IKEA [Internet]. BILLY. Disponibile all'indirizzo: <https://www.ikea.com/it/it/p/billy-libreria-bianco-00263850/>

190. Gaesco [Internet]. Scaffale in Metallo in Kit RAPIDONE 120x50x200 cm | GAESCO. Disponibile all'indirizzo: <https://www.gaesco.it/scaffale-in-metallo-in-kit-rapido-ne-120x50x200-cm-gaesco.119.357.gp.26645.uw>

191. Leroy Merlin [Internet]. Scaffale in kit 5 ripiani Pokerino L 90 x P 40 x H 180 cm grigio, portata per ripiano 175 kg. Disponibile all'indirizzo: <https://www.leroymerlin.it/prodotti/scaffale-in-kit-5-ripiani-pokerino-l-90-x-p-40-x-h-180-cm-grigio-portata-per-ripiano-175-kg-86375593.html>

192. Viva Interiors [Internet]. Catalogue Cassina: Veliero Franco Albini. Disponibile all'indirizzo: <https://viva-interiors.com/en/cassina/catalogue-veliero-franco-albini/8053/page-14/>

193. Mohd [Internet]. La bibliothèque Veliero de Cassina, le meuble manifeste de l'œuvre de Franco Albini. Disponibile all'indirizzo: <https://inspire.mohd.it/fr/la-bibliotheque-veliero-de-cassina-le-meuble-manifeste-de-loeuvre-de-franco-albini/>

Capitolo 7 - LA SPERIMENTAZIONE PROGETTUALE

194. Freepik [Internet]. Bel falegname lavorando su nuovi mobili. By Freepik. Disponibile all'indirizzo: <https://>

it.freepik.com/foto-gratuito/bel-falegname-lavorando-su-nuovi-mobili_11230086.htm#fromView=image_search_similar&page=1&position=28&uid=fe166618-9a8e-470e-857a-749291394d4a&new_detail=true&query=buying+wood+

195. A. Carnevale. Stampa 3D, da artigianato digitale a nuovo modello di produzione sostenibile. *Economicircolare* [Internet]. 29 Agosto 2022. Disponibile all'indirizzo: <https://economicircolare.com/artigianato-digitale-sostenibile-stampa-3d/>

196. Freepik [Internet]. Giovani coppie che scelgono le mattonelle al mercato della costruzione. By Freepik. Disponibile all'indirizzo: https://it.freepik.com/foto-gratuito/giovani-coppie-che-scelgono-le-mattonelle-al-mercato-della-costruzione_14492410.htm#fromView=search&page=1&position=1&uid=17a-a800b-702c-4e2b-8c69-249a325e3168&new_detail=true&query=buying+wood+

197. Leroy Merlin [Internet]. Falegnameria. Disponibile all'indirizzo: <https://www.leroymerlin.it/prodotti/falegnameria/>

198. Il Fai da te Guercio [Internet]. Legnami. Disponibile all'indirizzo: <https://www.ilfaidateguercio.com/reparti/legno/>

199. Tecnomat [Internet]. Pannelli, travi e legno da costruzione. Disponibile all'indirizzo: <https://www.tecnomat.it/it/c/porte-finestre-infissi-e-falegnameria/pannelli-travi-e-legno-da-costruzione/>

200. Bricofer [Internet]. Edilizia e falegnameria. Disponibile all'indirizzo: <https://www.bricofer.it/edilizia-e-falegnameria/>

201. Brico center [Internet]. Legno, Porte e Pavimenti. Disponibile all'indirizzo: <https://www.bricocenter.it/prodotti/default/legno-porte-e-pavimenti.html>

202. Tuttolegno [Internet]. Pannelli-tavole. Disponibile all'indirizzo: <https://www.tuttolegnobricolage.com/pannelli-tavole>

203. STTAN [Internet]. Prontuario Travi. Disponibile all'in-

dirizzo: https://sttan.it/appunti/Prontuario/Pront_Travi.pdf

204. Calcoli Online [Internet]. Trave sollecitata da un momento applicato in un punto della trave. Disponibile all'indirizzo: <http://www.calcoli-online.it/dimostrativo/travi/trave113.htm>

205. L. Caligaris, S. Fava, C. Tomasello, a cura di. *Manuale di meccanica*. Milano: Hoepli; 2016. 2272 p.

206. 3D Jake [Internet]. PolyTerra PLA Sunrise Orange, 1,75 mm / 1000 g (1.000 grammi). Disponibile all'indirizzo: <https://www.3djake.it/polymaker/polyterra-pla-sunrise-orange>

207. Bambu Lab [Internet]. Bambu Lab X1C 3D Printer. Disponibile all'indirizzo: <https://eu.store.bambulab.com/en-it/collections/3d-printer/products/x1-carbon>

208. VIRTUALAB: Politecnico di Torino [Internet]. VirtualAB. Disponibile all'indirizzo: https://www.dad.polito.it/il_dipartimento/laboratori_e_centri/laboratori/area_della_virtualita_della_comunicazione_multimediale_e_dei_modelli_reali/make_lab_arch_design_laboratorio_interdipartimentale/virtualab



Il design di ricerca considera il giunto tra due o più elementi di un sistema costruttivo più che un dettaglio. Lì si concentra l'ingegno del progettista che è alla ricerca di nuove modalità funzionali e/o espressive. Il giunto diventa allora oggetto di attenzione, diventando protagonista della composizione, soprattutto quando è in vista, e alimentando curiosità strutturali. La tesi guarda a questa modalità di collegamento considerando l'odierno contesto di transizione digitale e di progettazione aperta.

Transizione digitale: Con l'avvento delle tecnologie digitali per la fabbricazione rapida (FDM) si è infatti aperta una nuova era in cui è possibile progettare, realizzare e comparare soluzioni diverse di forme complesse in un tempo minimo. Contemporaneamente, i software di design generativo aiutano nello sperimentare le forme più convenienti, considerando ad esempio la resistenza strutturale e il risparmio di materiale, ma anche generando nuovi linguaggi espressivi.

Progettazione aperta: Spingendosi oltre, i modelli che ne derivano, sottoposti a test prestazionali funzionali, strutturali e di stampabilità, possono anche ambire ad un mercato open source, in cui l'utente può scaricare il modello digitale del giunto per stamparlo autonomamente o tramite terzi (service).

Tutto dipende ancora una volta da auspicabili incrementi tecnologici: occorrono infatti stampanti sempre più veloci, economiche e sostenibili per poter considerare la RP (Rapid Prototyping) competitiva con la produzione industriale. Ma, al di là di questa valutazione, l'impiego di software generativi e la RP costituiscono un utile strumento per lo studio del linguaggio espressivo.

Al fine, la tesi individua come "officina di idee e di sperimentazione" un arredo archetipo della casa e dell'ufficio: la scaffalatura. L'obiettivo, però, non è ridefinire il concetto di scaffale, ma sfruttare in ottica di autocostruzione open source le potenzialità compositive e strutturali di elementi semplici come aste e piani in legno (di quelli che si trovano nei brico center), connesse da giunti studiati per un equilibrio tra resistenza strutturale, riduzione del materiale, montabilità intuitiva e stile.

Claudio Germak