



# Modellazione parametrica e Generative Design

Il progetto bio-ispirato di un'architettura in  
simbiosi con la natura

Riccardo Grecu  
Mohamed Yasser Hariss





**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea  
A.A. 2020/2021  
Sessione di Laurea Luglio 2021

# **Modellazione parametrica e Generative Design**

Il progetto bio-ispirato di un'architettura in simbiosi con la natura

Relatori:  
Prof. Massimiliano Lo Turco  
Prof.ssa Francesca Thiebat  
Prof. Paolo Scoglio  
Arch. Andrea Tomalini

Candidati:  
Riccardo Greco  
Mohamed Yasser Hariss





# Indice

Introduzione	1
--------------	---

## Sezione 1 - Strumenti di progetto

<b>1</b>	<b>Progettazione computazionale ed evoluzione degli strumenti per il progetto</b>	<b>5</b>
1.1	Progettazione computazionale	7
1.2	Computazione analogica	11
1.3	Parametrico	13
1.4	Evoluzione Strumenti di rappresentazione e modellazione	17
<b>2</b>	<b>Visual Programming Language: definizione, metodologia e logica di funzionamento</b>	<b>21</b>
2.1	Introduzione al linguaggio di programmazione visuale	23
2.2	Evoluzione dei software VPL	24
2.3	William John Mitchell e i metodi di modellazione della forma architettonica	26
2.4	Confronto tra programmazione testuale e programmazione visuale	29
2.5	Grasshopper	30
<b>3</b>	<b>La nuova frontiera della progettazione: il Generative Design</b>	<b>35</b>
3.1	Il Generative Design	37
3.2	Dibattiti e vantaggi	40
3.3	Innovazione digitale	42
3.4	Algoritmo genetico	44
3.5	Applicazioni della progettazione generativa	46
3.6	Wallacei	49

## Sezione 2 - Temi progettuali

<b>4</b>	<b>La riscoperta del legno</b>	53
4.1	Il legno	55
4.2	Proprietà	59
4.3	Classificazione	61
4.4	Effetti fisiologici e psicologici	63
4.5	Ambiente, foreste e certificazioni	67
<b>5</b>	<b>Digital Fabrication, dal bit alla materia</b>	73
5.1	Fabbricazione digitale	75
5.2	Tecniche di fabbricazione	78
5.3	Tecniche avanzate di assemblaggio	83
5.4	Fabbricazione digitale e ricerca accademica	85
<b>6</b>	<b>Forest Therapy e Outdoor Education</b>	97
6.1	Forest Therapy	99
6.2	Outdoor Education	107
6.3	Architetture per l'educazione all'aperto	111
<b>7</b>	<b>Bando di concorso per lo Spazio Thetis</b>	117
7.1	Tema del bando	119

## Sezione 3 - Il progetto

<b>8</b>	<b>Obiettivi di progetto e analisi profili utenza</b>	125
8.1	Obiettivi e temi di progetto	127
8.2	Workflow	129
8.3	Profilo utenza: attività, esigenze e requisiti	130
8.4	Riferimenti normativi	132
8.5	L'albero	133
8.6	I parametri di progetto	135
8.7	Tassellatura di Voronoi	137

<b>9</b>	<b>Processo computazionale e generativo del padiglione</b>	145
9.1	Schema riassuntivo	147
9.2	Introduzione ai concetti base della gestione dei dati di Grasshopper	149
9.3	Script geometria di progetto	155
9.4	Interni	170
9.5	Wallacei X	175
<b>10</b>	<b>Progetto: dettagli tecnologici ed elaborati grafici</b>	197
10.1	Geometria di progetto	199
10.2	Sistema di supporto ed elaborati grafici	200
10.3	Impatto ambientale	219
10.4	Plastico prodotto con stampante 3D	229
10.5	Modello ligneo in scala 1:2 e render	239
	<b>Conclusioni</b>	283
	<b>Bibliografia e sitografia</b>	285
	<b>Ringraziamenti</b>	295



# Introduzione

Il lavoro di ricerca nasce dalla curiosità e volontà di approfondire tematiche attuali sull'innovazione dei programmi e delle tecniche che recentemente si sono affacciate al panorama degli strumenti per l'architettura e che influenzeranno il lavoro dei progettisti. L'automazione digitale e lo sviluppo di questi strumenti mettono in luce nuovi possibili approcci per la progettazione e la pianificazione architettonica.

La tesi, suddivisa in tre sezioni, ripercorre l'iter di studio e approfondimento della metodologia in uso per poi culminare nell'applicazione di un progetto per il bando di concorso promosso dallo Spazio Thetis, dove si è proposta un'architettura in simbiosi con la natura. L'albero, elemento cardine del progetto, contribuisce a definire e dare forma al padiglione in base alla sua conformazione e morfologia.

Nella prima sezione vengono analizzate e documentate le competenze acquisite in riferimento alla progettazione computazionale, agli strumenti di Visual Program Language e Generative Design. Nella seconda sono presentate le tematiche sulle

quali verte la proposta progettuale. Il percorso di indagine ha portato allo studio del legno come materiale rinnovabile ed ecologico, dei benefici fisiologici e psicologici apportati dalla Forest Therapy e dall'Outdoor Education. La successiva indagine sulla Digital Fabrication mostra come sia possibile generare, attraverso l'uso di macchine a controllo numerico, un oggetto fisico partendo da un modello virtuale. L'ultima sezione illustra l'idea di padiglione in simbiosi con la natura, un'architettura integrata con l'albero.

Il risultato ottenuto è frutto del processo di attuazione dei metodi studiati che, insieme all'analisi delle esigenze degli utenti, ha permesso di definire i parametri sui quali sviluppare le proposte. Il padiglione è stato realizzato mediante l'utilizzo di software di modellazione e di ottimizzazione che fa ricorso ad algoritmi evolutivi. Il progetto pone particolare attenzione alla fattibilità tecnica ed economica coinvolgendo artigiani e aziende nell'ambito della lavorazione del legno e stampa 3D. Il rapporto di scambio e collaborazione ha portato alla produzione dei modelli di studio in scala.

# Sezione 1

## Strumenti di progetto



# 01

## Progettazione computazionale ed evoluzione degli strumenti per il progetto

di  
Riccardo Grecu

In questo capitolo si definisce la differenza tra design digitale e design computazionale, il primo consiste nell'utilizzo di strumenti digitali nel processo progettuale mentre il secondo si avvale di una procedura logico-algoritmica per risolvere un determinato problema e che non necessita l'uso del computer. Qualsiasi problema di progettazione può essere descritto come un modello costituito da un insieme di variabili e relazioni logiche tra loro correlate.

Disegno tecnico prima dell'invenzione del CAD,  
fotografia in <https://rarehistoricalphotos.com>.



## 1.1 Progettazione computazionale

Nel processo progettuale, la fase ideativa precede sempre la costruzione, progettare deriva dall'organizzazione di idee, dalla gestione di risorse e dalla previsione di risultati. Risorse come matite e righelli, sono strumenti imprescindibili nell'atto creativo rimasti pressoché immutati nel corso dei secoli, soltanto negli ultimi decenni il ruolo del computer si è affiancato come strumento nell'ambito progettuale.

I computer hanno iniziato ad aiutare gli architetti, a simulare lo spazio fino a diventare uno strumento integrante nel processo di progettazione.

Nell'era digitale la rapida alfabetizzazione informatica ha determinato il consolidato utilizzo di computer in ambito architettonico e questo ha avuto un'influenza diretta sul processo di generazione e gestione di forme.

La modellazione computerizzata si basa sulla logica elaborativa dell'informazione, gli attuali algoritmi consentono ai progettisti di superare i limiti dei software CAD tradizionali, raggiungendo il completo controllo per ogni livello di complessità e dimostrandosi così un valido supporto al lavoro degli architetti.<sup>1</sup>

I dati sono fondamentali per sviluppare qualsiasi tipo di progetto, che si tratti del design di un mobile d'arredo o di un grattacielo. Per affrontare la complessità del mondo reale, gli architetti e i designer devono comprendere e controllare set di dati di varia natura, raccogliarli ed elaborarli per informare il progetto e cercare nuove strategie per la sua gestione al fine di trovare la migliore soluzione al problema.<sup>2</sup>

Occorre fare una distinzione tra design digitale e design computazionale, il primo consiste nell'utilizzo di strumenti digitali nel processo progettuale mentre il design computazionale deriva da computare, non implicando quindi l'uso necessario di un computer, significa infatti risolvere una determinata problematica utilizzando una procedura algoritmica.<sup>3</sup>

Qualsiasi problema di progettazione può essere descritto come un modello astratto costituito da un insieme di variabili e relazioni logiche tra loro correlate.

Computazione è un termine spesso confuso con **informatizzazione** che è l'atto di inserire, elaborare informazioni in un computer o in un sistema informatico

<sup>1</sup>Giorgio Buratti, *Algorithmic Modelling of Triply Periodic Minimal Surface* in Paolo Cascone, Elena Ciancio, Flavio Galdi, Andrea Giglio (a cura di), *Computational Morphologies*, Springer International Publishing, 2018, p. 55.

<sup>2</sup>Arturo Tedeschi, Davide Lombardi, *The Algorithms-Aided Design (AAD)* in Marco Hemmerling, Luigi Cocchiarella (a cura di), *Informed Architecture Computational Strategies in Architectural Design*, Springer International Publishing, 2018, pp. 33-38.

<sup>3</sup>Inês Caetano, Luís Santos, António Leitão, *Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design* in «Frontiers of Architectural Research», vol. 9, 2020, pp. 287-300.

e riguarda l'automazione, la meccanizzazione e la digitalizzazione.

La computazione invece riguarda l'esplorazione di processi indeterminati per via della sua natura esplorativa e fa uso di logica, deduzione, estrapolazione, esplorazione e stima.<sup>4</sup>

Un **algoritmo** è una procedura computazionale che implica deduzione e astrazione logica per risolvere un problema in un numero finito di passaggi.

La sequenza algoritmica attraverso un elenco finito di istruzioni ben definite restituisce una soluzione a una domanda o un problema. Sebbene siano associati all'informatica, gli algoritmi ne sono indipendenti e sono applicabili in molti ambiti, infatti, anche una ricetta può essere considerata un algoritmo in quanto la procedura per cucinare si basa su un semplice elenco di istruzioni il cui ordine e metodo di esecuzione fanno variare il risultato finale.<sup>5</sup>

### Rappresentazione schematica di un algoritmo

Fig. 1



<sup>4</sup> Designcoding, <https://www.designcoding.net>, (consultato Marzo 2021).

<sup>5</sup> Arturo Tedeschi, *AAD algorithms aided design*, Le Penseur, 2014, pp. 22-23.

L'approccio alla progettazione computazionale in ambito accademico fu introdotto per la prima volta da William John Mitchell, Robin Segerblom Liggett e Thomas Kvan in "The Art of Computer Graphics Programming" nel 1987. Il concetto di pensiero progettuale computazionale è correlato al pensiero algoritmico che gli architetti usano nel loro processo di progettazione.<sup>6</sup>

**Fig. 1** Schema di un algoritmo in Arturo Tedeschi, *AAD algorithms aided design*, pp. 22-23.

L'algoritmo, è implicitamente presente nella mente di un designer, ne diventa una sorta di codice di condotta per l'ottenimento di un prodotto o risoluzione di un problema.

Bruno Munari, nel libro "Da cosa nasce cosa. Appunti per una metodologia progettuale", esplora il processo mentale di un designer.

<sup>6</sup> Birgül Çolakoğlu, Tuğrul Yazar, *An innovative design education approach: computational design teaching for architecture* in «METU, Journal of the Faculty of Architecture», vol. 24, 2007, pp. 159-168.

«Quando un problema si può risolvere non è un problema».7

Secondo Munari il problema contiene già in sé tutti gli elementi necessari alla sua risoluzione ed è compito del designer saper riconoscere tali elementi sottostando ad una metodologia.

In realtà il processo di progettazione è leggermente diverso rispetto a quello mostrato da Munari in quanto

Fig. 2



7 Bruno Munari, *Da cosa nasce cosa*, Laterza, 1981, p. 35.

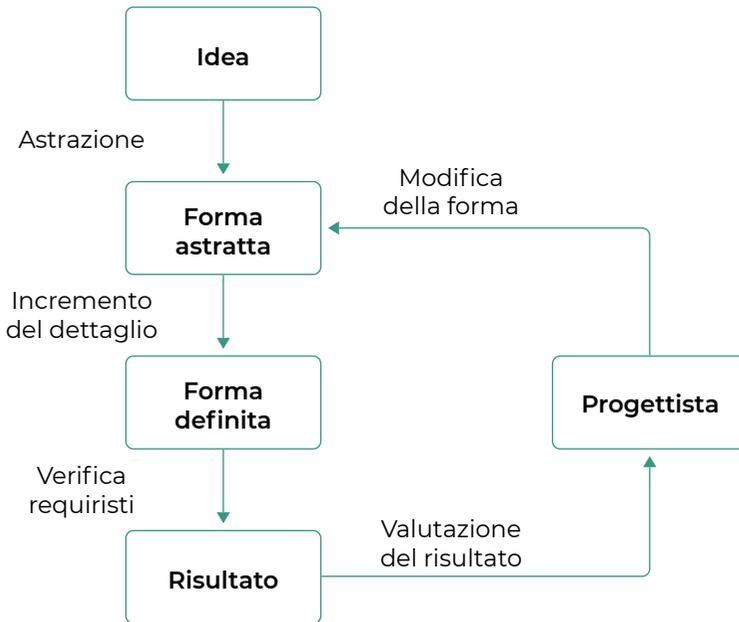
Fig. 2 Sequenza di operazioni disposte secondo un ordine logico per l'ottenimento della soluzione di un problema. Contenuto nel libro *Da cosa nasce cosa* di Bruno Munari.

la verifica agisce direttamente con tutte le fasi che lo precedono in un sistema dialogante piuttosto che una serie di passaggi consecutivi.<sup>8</sup>

Questo processo è trasposto nei moderni software di programmazione che applicano questa logica di funzionamento attraverso la costruzione di algoritmi per generare spazio e forma da regole e parametri.<sup>9</sup>

### Metodo di progettazione tradizionale

Fig. 3



<sup>8</sup> Andrea Casale, Michele Calvano, *Represented models and typological algorithms: the role of parametric models for the design of product* in Paolo Cascone, Elena Ciancio, Flavio Galdi, Andrea Giglio (a cura di), *Computational Morphologies*, Springer International Publishing, 2018, pp. 63-68.

### Metodo di progettazione parametrica



<sup>9</sup> Kostas Terzidis, *Algorithmic Design: a paradigm shift in architecture?*, atti della conferenza Architecture in the Network Society, 15-18 Settembre 2004, Copenhagen, Danimarca, pp. 201-207.

**Fig. 3** Confronto tra metodo di progettazione tradizionale e parametrica. Elaborazione grafica tratta da tesi di laurea di Martino Margoni, intitolata *Architettura contemporanea e strumenti per la progettazione architettonica*.

## 1.2 Computazione analogica

Il disegno tradizionale è una risorsa indispensabile per il progettista, l'architetto Arturo Tedeschi definisce il disegno tradizionale come un "processo additivo" in cui la sovrapposizione di tratti grafici indipendenti sulla carta definiscono una rappresentazione architettonica.<sup>10</sup>

Il limite maggiore del disegno tradizionale è evidenziato dal fatto che un oggetto è rappresentato dall'aggiunta di informazioni tra loro non correlate, infatti, il disegno tecnico si basa su regole e codifiche grafiche piuttosto che su relazioni tra parti, risultando così differente rispetto al meccanismo cognitivo.

La volontà di superare questo limite per rappresentare al meglio la propria idea è stata affrontata da numerosi architetti nel corso della storia che hanno adottato metodi investigativi e strumenti alternativi.

L'esplorazione delle forme tramite l'uso di metodi computazionali analogici, usati da progettisti come Antoni Gaudí, Frei Paul Otto e Sergio Musmeci, avevano lo scopo di investigare l'ottimizzazione formale studiando i fenomeni aggregativi della materia con modelli simulativi fisici.

**Antoni Gaudí** attraverso modelli fisici realizzati con corde e pesi simulò le configurazioni di archi catenari che caratterizzano le sue architetture, sfruttando la forza di gravità nei suoi modelli di studio, anche **Frei Paul Otto**, noto per le sue sperimentazioni formali sulle superfici minime, adottò film di sapone o reti elastiche per indagare le tensostrutture (fig. 4).

Membrane tese e plastici in scala furono invece impiegati da **Sergio Musmeci** per progettare il Ponte sul Basento a Potenza (fig. 5), egli rinunciò a elementi lineari come pilastri in favore di forme morbide e sinuose realizzate in calcestruzzo armato.<sup>11</sup>

<sup>10</sup> Arturo Tedeschi, *AAD algorithms aided design*, Le Penseur, 2014, p. 16.

<sup>11</sup> Martino Margoni, *Architettura contemporanea e strumenti per la progettazione architettonica. Differenti approcci alla modellazione*, tesi di Laurea in Architettura, Politecnico di Milano, a.a 2016-2017, rel. Prof. ssa Ingrid Paoletti, pp. 15-23.

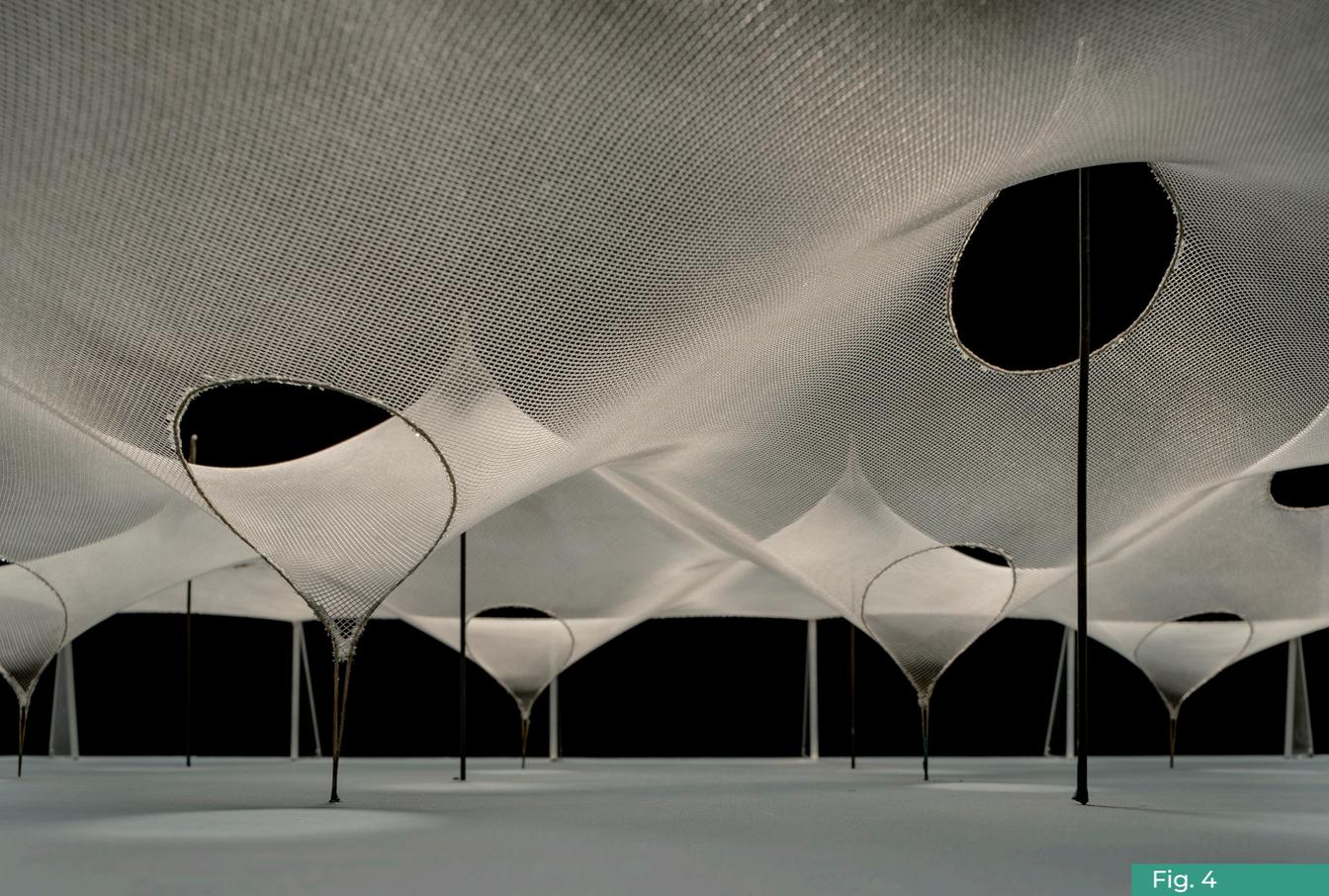


Fig. 4



Fig. 5

**Fig. 4** Plastico del Karlsruhe Institute of Technology, realizzato con tessuto elastico da Frei Otto, foto di Bernd Seeland in Archivio di Architettura e Ingegneria civile della Germania Sudoccidentale (SAAI), Works Archive. In <https://zkm.de>.

**Fig. 5** Fotografia del Ponte sul Basento a Potenza, noto anche come Ponte Musmeci progettato dall'omonimo progettista tra il 1967 e 1975. In <https://www.atlantearchitettura.beniculturali.it>.

## 1.3 Parametrico

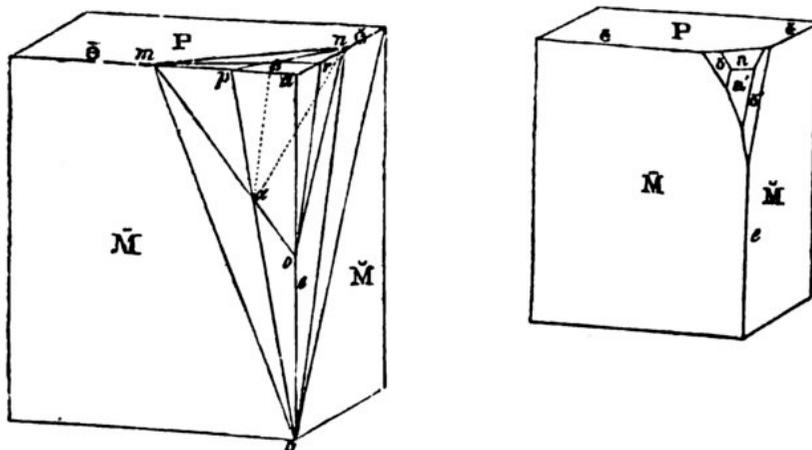
Il termine parametrico ha origine in matematica, in riferimento alle equazioni parametriche che il vocabolario Treccani così definisce:

«In matematica, sono dette equazioni parametriche le equazioni che definiscono un luogo (curva, superficie, ecc.), non assegnando legami diretti tra le coordinate dei suoi punti, bensì esprimendo tali coordinate in funzione di una o più variabili indipendenti (parametri), l'eliminazione dei quali porta a una o più relazioni dirette tra le coordinate dei punti del luogo».<sup>12</sup>

Si ricava che l'equazione parametrica è definita da un insieme di variabili, chiamati parametri, correlati attraverso funzioni esplicite.

**James Dana**, nel libro "The system of mineralogy" nel 1837 descrive i passaggi utili per disegnare il modello tridimensionale di un cristallo attraverso l'esplicitazione di relazioni tra parti in cui le superfici geometriche sono tra loro correlate con rapporti dimensionali.<sup>13</sup>

Fig. 6



<sup>12</sup> Parametrico, in <https://www.treccani.it/Vocabolario-online>.

<sup>13</sup> James Dana, *On the Drawing of Figures of Crystals* in «American Journal of Science and Arts», vol. 18, 1837, pp. 32-50.

**Fig. 6** Disegni realizzati da James Dana per mostrare i rapporti dimensionali di un cristallo in *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture* di Daniel Davis.

La descrizione di Dana, in ambito cristallografico, influenzerà più di un secolo dopo l'architetto Luigi Moretti che, secondo Robert Stiles, fu il primo ad associare il termine parametrico all'ambito architettonico.

Nel 1939 **Luigi Moretti** diede la prima definizione di

**architettura parametrica** come metodo di progettazione secondo parametri logico-matematici, fisici, psicologici, sociologici ed economici.<sup>14</sup>

L'architetto fondò con il matematico Bruno de Finetti l'**IRMOU** (l'Istituto nazionale di Ricerca Matematica e Operativa per l'Urbanistica) con l'intento di studiare nuove relazioni tra architettura e matematica.

Le loro ricerche culminarono nella mostra allestita per la dodicesima Triennale di Milano, nel 1960, nella quale vennero presentati i risultati dei loro studi accompagnati da un innovativo progetto per uno stadio la cui forma ottimizzava l'angolo di visione degli spettatori e la fattibilità economica.

Le relazioni dimensionali tra gli spalti e il campo erano espresse in parametri matematici e i punti che segnalavano le visuali migliori erano collegati per generare curve dando forma agli spalti.<sup>15</sup>

<sup>14</sup> Daniel Davis, *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*, tesi di dottorato in Architettura, Royal Melbourne Institute of Technology, 2013, pp. 18-27.

<sup>15</sup> Annalisa Viati Navone, *Un nuovo linguaggio per il pensiero architettonico. Luigi Moretti, ricerca operativa e architettura parametrica* in Bruno Reichlin, Letizia Tedeschi (a cura di), *Luigi Moretti. Razionalismo e trasgressività tra barocco e informale*, Milano: Electa, 2010, pp. 409-419.

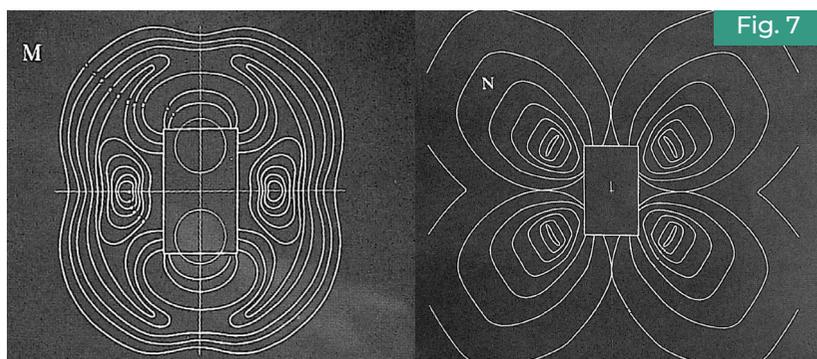


Fig. 7

**Fig. 7** Piante alternative (M e N) per il progetto dello stadio che mostrano le curve generatrici. In Luigi Moretti : opere e scritti a cura di Federico Bucci e Marco Mulazzani.

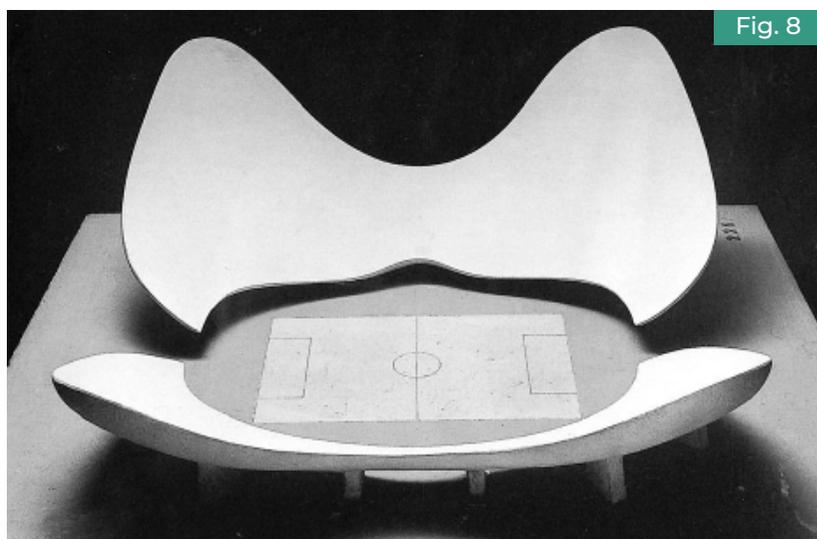


Fig. 8

**Fig. 8** Fotografia del plastico dello stadio Progettato da Luigi Moretti in collaborazione con Bruno De Finetti e presentato alla "Mostra di Architettura Parametrica e di Ricerca Matematica e Operativa nell'Urbanistica", XII Triennale di Milano, 1960. In <https://www.archilovers.com>.

Ipotesi semplificate per l'esempio presentato:

Par. 1 - visibilità dell'intero campo;

Par. 2 - migliore appetibilità visiva di una zona particolare del campo;

Par. 3 - alta velocità degli spostamenti del glicoc (traiettoria della palla) e di conseguenza massimo fisiologico (proporzionale con il campo visivo 100°);

Par. 4 - appetibilità visiva in funzione della distanza dal centro del campo e dell'angolo sotto cui è vista la zona di interesse.

La funzione della visibilità (W) è stata definita come il prodotto di due funzioni, una dipendente dall'angolo sotto cui è vista la zona di interesse e l'altra della distanza dal centro del campo

$$w = k \cdot \left( \frac{r}{b} \right)^n$$

Nel modello:  $k$  - lit. r. r.  $r$  - h = \lambda

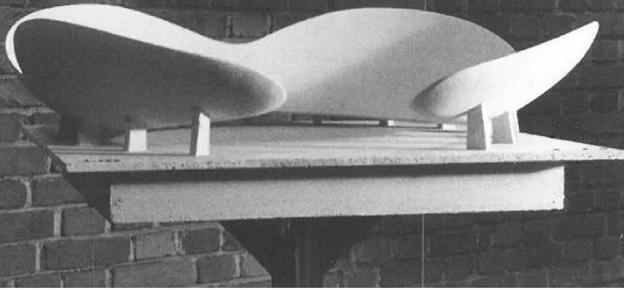
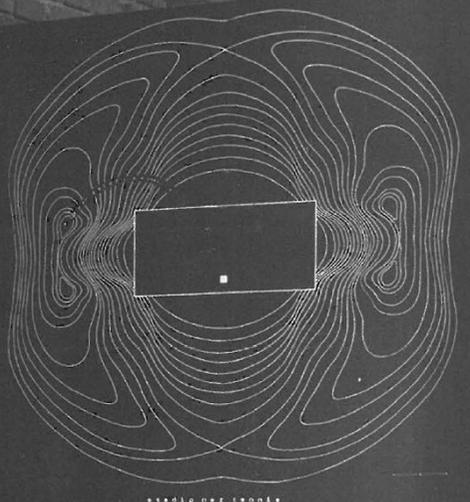
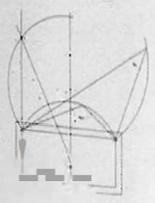


Fig. 9

**Fig. 9** Fotografia dell'allestimento "Mostra di Architettura Parametrica e di Ricerca Matematica e Operativa nell'Urbanistica", XII Triennale di Milano, 1960. Contenuto nel libro Luigi Moretti. *Razionalismo e trasgressività tra barocco e informale di Bruno Reichlin, Letizia Tedeschi.*

<sup>16</sup> Federico Bucci, Marco Mulazzani, *Luigi Moretti. Opere e scritti*, Milano: Electa, 2000, pp. 204-208.

«I "parametri" e le loro interrelazioni divengono così l'espressione, il codice, del nuovo linguaggio architettonico, la "struttura", nel senso originario e rigoroso del vocabolo [...]. Alla determinazione dei "parametri" e loro interrapporti, debbono chiamarsi a coadiuvare le tecniche e le strumentazioni del pensiero scientifico più attuali; particolarmente la logica-matematica, la ricerca operativa e i computers, specie questi per la possibilità che danno di esprimere in serie cicliche autocorrettive le soluzioni probabili dei valori dei parametri e delle loro relazioni».<sup>16</sup>

Con queste parole Moretti evidenzia il potenziale dei computer per l'architettura e ne prevede la futura diffusione.

Uno degli esempi più interessanti che evidenzia la continuità computazionale, effettuata in modo analogico e con strumenti contemporanei parametrici, è il masterplan Kartal Pendik di Zaha Hadid per la città di Istanbul.

La logica dei percorsi adottata deriva dagli studi effettuati

da Frei Otto il quale sperimentava empiricamente l'aggregazione di filamenti sottoponendoli a campo elettrostatico per definirne il percorso più breve.

Zaha Hadid ha quindi simulato e riprodotto a scala urbana lo stesso processo condotti 15 anni prima dall'architetto tedesco ma usando il software Grasshopper per Rhinoceros.<sup>17</sup>

Fig. 10



<sup>17</sup> Andrea Galli, *Nuove metodologie progettuali: aspetti innovativi dell'urbanistica parametrica*, tesi di Laurea in Ingegneria Edile per il Recupero, Università degli Studi di Messina, a.a. 2010-2011, rel. Prof. Michelangelo Savino, pp. 41-46.

**Fig. 10** Disegno del masterplan Kartal Pendik. In <https://www.zaha-hadid.com>.

## 1.4 Evoluzione strumenti di rappresentazione e modellazione

Pochi anni dopo la definizione di architettura parametrica di Luigi Moretti nel 1963, Ivan Sutherland sviluppò sul computer TX-2, presso il Massachusetts Institute of Technology di Boston, **Sketchpad**, il primo programma CAD (Computer Aided Design) nonché la prima applicazione di computer grafica.

Il sistema permise agli utenti di lavorare con una penna ottica per creare geometrie primitive, come linee e cerchi, e quindi applicare successivamente operazioni e vincoli.

Nel 1982 venne rilasciato **Autocad** e nel 1988 dalla Parametric Technology Corporation il software **Pro/ENGINEER**, il primo modellatore parametrico di geometrie tridimensionali di successo commerciale, ideato dal matematico Samuel Geisberg che così descrive le motivazioni della modellazione parametrica.

«L'obiettivo è creare un sistema sufficientemente flessibile da incoraggiare l'ingegnere a considerare facilmente una varietà di progetti. Il costo delle modifiche al progetto dovrebbero tendere il più vicino possibile allo zero».<sup>18</sup>

Negli anni 90 del Novecento gli strumenti digitali parametrici per l'architettura avevano già iniziato a diffondersi, il museo Guggenheim di Bilbao di Frank Gehry, fu realizzato grazie all'adozione del software **CATIA**, un programma inizialmente nato per l'industria aerospaziale.

All'inizio del XXI secolo nascono i primi software **BIM** (Building Information Modeling) in cui un modello tridimensionale parametrico editabile costituisce l'interfaccia che contiene tutte le informazioni per la gestione e la pianificazione del progetto.

A questa categoria fa parte **Revit**, ideato nel 2000 e acquistato dalla software house Autodesk due anni più tardi ed è ancora oggi uno dei programmi BIM più usati.

Con l'avvento della programmazione visuale creare codici informatici è diventato più accessibile ai designer

<sup>18</sup> John Teresko, *Parametric Technology Corp. Changing the Way Products Are Designed* in «Industry Week», 1993.

e lo spazio digitale diventa un laboratorio virtuale in cui sperimentare nuove forme.

La possibilità di rendere espliciti ed editabili gli algoritmi informatici consente ai progettisti di superare il limite determinato dalle rigide interfacce dei programmi di progettazione tradizionali, caratterizzate da comandi preimpostati.

Utilizzando i software di programmazione VPL, come **Grasshopper**, i progettisti possono andare oltre il mouse e l'interfaccia dei comandi.<sup>19</sup>

Fino ad arrivare al Generative Design, dove il calcolo del computer supporta il progettista durante la fase creativa con il contributo dell'intelligenza artificiale e algoritmi evolutivi che verranno approfonditi nei capitoli seguenti.



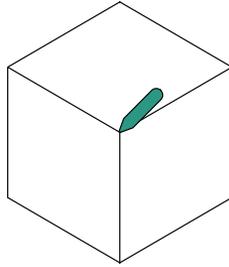
Fig. 11

<sup>19</sup> Daniel Davis, *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*, tesi di dottorato in Architettura, Royal Melbourne Institute of Technology, pp. 18-27.

**Fig. 11** Sistema CAD basato su mainframe IBM 360/67 presso Fairchild nel 1967. In <https://www.computerhistory.org>.

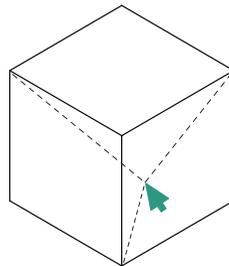
Fig. 12

## Evoluzione strumenti

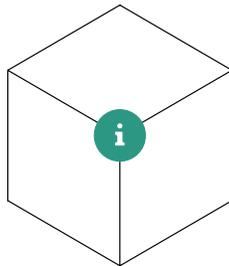


Il **disegno tecnico** è una rappresentazione che si avvale di strumenti come righelli e squadre.

È un processo additivo in cui l'esplicitazione di linee, archi e cerchi nel disegno arricchiscono dettaglio e informazioni.

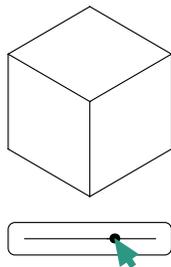


Il disegno tramite software **CAD** è la trasposizione del disegno tecnico in vettoriale dove le informazioni sono limitate e possono essere ricavate direttamente nel modello.

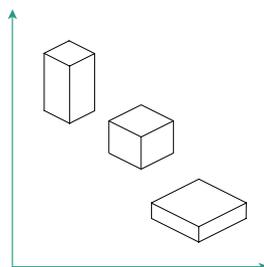


I software **BIM** generano un modello informativo che include dati utili per il progetto.

Segna il passaggio da una rappresentazione vettoriale ad un modello informativo al fine di scambiare dati fra le diverse figure professionali.



Il **VPL** è un linguaggio di programmazione visuale basato sulla manipolazione di elementi grafici al fine di modellare, gestire geometrie e informazioni.



Il **Generative Design** è uno strumento per l'esplorazione progettuale e consiste in un processo iterativo che utilizza algoritmi evolutivi per restituire una serie di soluzioni in base a dei vincoli imposti.

**Fig. 12**  
Rappresentazione schematica dell'evoluzione degli strumenti di disegno e rappresentazione architettonica.  
Elaborato personale.



# 02

## Visual Programming Language: definizione, metodologia e logica di funzionamento

di  
Riccardo Grecu

La professione dell'architetto si sta interfacciando e adattando alle numerose innovazioni tecnologiche dell'era digitale.

Con i software di modellazione parametrica Visual Program Language, si creano geometrie esplicitando sequenze logico-matematiche, istruzioni definite attraverso la manipolazione di elementi grafici.

Lo scopo è quello di rendere la programmazione più intuitiva garantendo gestione e controllo totale sui parametri del modello tridimensionale.

Lampada HorizON, progettata da Arturo Tedeschi,  
Michael Pryor, Pavlina Vardoulaki con software di  
modellazione VPL, realizzata in vetro stampato in 3D e  
presentata nel 2020 alla Venice Glass Week.  
In <https://www.arturotedeschi.com>.



## 2.1 Introduzione al linguaggio di programmazione visuale

La programmazione informatica, in passato, era considerata un settore specializzato ad uso di soli informatici e ingegneri; con l'aumento di software di modellazione sempre più avanzati, l'uso dello scripting si è esteso anche in ambito architettonico.

Questa innovazione ha dato vita ad un'ampia gamma di nuove possibilità e la scoperta del potenziale della programmazione in architettura, ha spinto molti architetti ad interfacciarsi con questa nuova pratica e ad utilizzarla anche nel processo progettuale.

La diffusione dei linguaggi di programmazione ad uso di designer e architetti è stata facilitata dal VPL che ne semplifica l'uso.<sup>1-2</sup>

<sup>1</sup>Mark Burry, *Scripting Cultures: Architectural Design and Programming*, John Wiley & Sons, 2011.

<sup>2</sup>Inês Caetano, António Leitão (a cura di), *Using Processing with Architectural 3D Modelling*, atti della 34a conferenza Complexity & Simplicity: eCAADe, 2 Agosto 2016, Oulu, Finlandia, vol. 1, pp. 405-412.

<sup>3</sup>Fulvio Wirz, Prefazione in Arturo Tedeschi (a cura di), *Architettura parametrica. Introduzione a Grasshopper*, Le Penseur, Potenza, 2010, p. 8.

<sup>4</sup>Victor Theodor Cusniriuc, Jorge Martillo Flores Bonavalle, *Rilievo metrico 3D, HBIM e VPL per la salvaguardia del patrimonio architettonico*, tesi di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città, Politecnico di Torino, a.a. 2018-19, rel. Prof. Massimiliano Lo Turco.

Il VPL, acronimo di Visual Program Language, traducibile in linguaggio di programmazione visuale, ha ridefinito la modellazione tridimensionale e il disegno digitale rendendo più accessibile e semplice la programmazione in un'ottica di intuitività.

Attraverso il visual scripting la modellazione geometrica consiste nell'esplicitazione di una o più sequenze di istruzioni tramite la manipolazione di elementi grafici visuali.

Viene a definirsi quindi un algoritmo, composto da variabili e comandi, su cui sussiste una relazione sequenziale.

L'assemblaggio di strutture grafiche, simili a diagrammi di flusso, sintetizza il processo logico del designer.

La logica algoritmica scompone l'iter procedurale in passaggi più semplici, istruzioni elementari che vengono assegnate al computer.<sup>3-4</sup>

Ad oggi sono presenti un ampio numero di software VPL in grado non solo di gestire la modellazione di forme complesse ma anche di realizzare operazioni come simulazioni fisico ambientali, analisi energetiche, studi illuminotecnici e gestione dati.

## 2.2 Evoluzione dei software VPL

L'aumento della velocità di elaborazione dei computer e le migliori capacità di visualizzazione grafica digitale degli ultimi decenni, hanno reso possibile la ricerca e sperimentazione nel campo del linguaggio di programmazione.

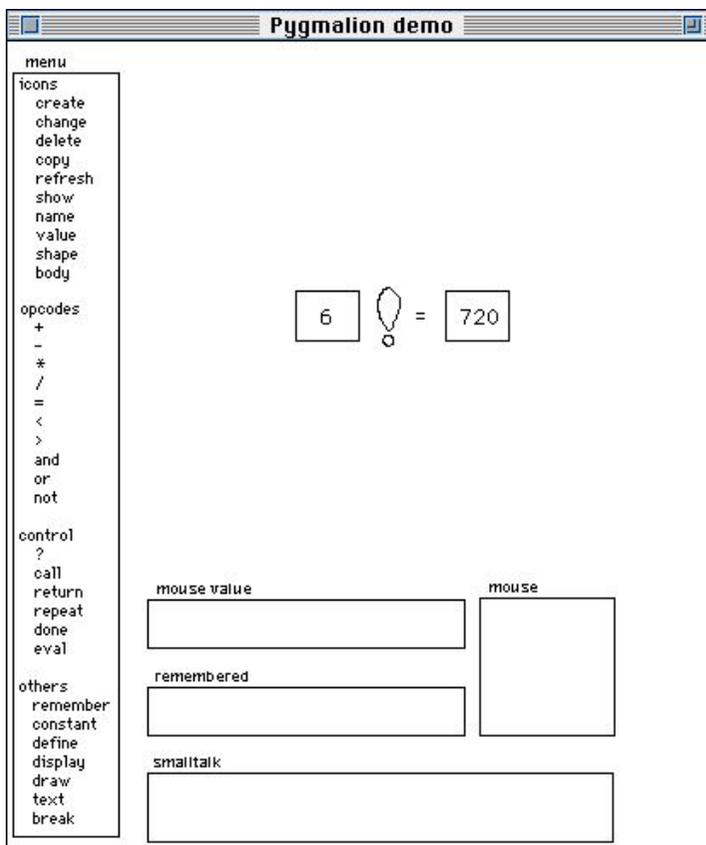
La programmazione visiva è così diventata una valida alternativa alla rigida esecuzione della programmazione testuale.

Il software Sketchpad, sviluppato da Ivan Sutherland nel 1963, forniva una schermata definita flow chart che consiste nella restituzione grafica dei vincoli di disegno tramite diagrammi.<sup>5</sup>

Anche **William Sutherland**, nel 1965, ha dato un importante contributo alla programmazione visiva, sviluppando un linguaggio visivo per il flusso di dati.

Ma il più grande apporto nella genesi dei VPL è stato attribuito a **David Canfield Smith** nel 1975 con la pubblicazione della tesi di dottorato intitolata "Pygmalion. Un ambiente di programmazione creativa".<sup>6</sup>

Fig. 1



<sup>5</sup> Arturo Tedeschi, *AAD algorithms aided design*, Le Penseur, 2014, p. 27.

<sup>6</sup> Marat Boshernitsan, Michael Downes, *Visual Programming Languages: a survey*, rapporto per la Computer Science Division, EECS University of California, Berkeley, 2004.

**Fig. 1** Simulazione dell'interfaccia di Pygmalion, l'aspetto della finestra differisce leggermente dall'originale ma illustra il funzionamento del programma. In <http://acypher.com>.

Pygmalion può essere definito l'antenato dei moderni software VPL, è sia un linguaggio di programmazione che un mezzo per sperimentare idee, progettato per stimolare il pensiero creativo. Il programma consiste in un ambiente di programmazione visuale bidimensionale, la comunicazione tra uomo e computer avviene per mezzo di icone che sono disegnate sul display.

L'editor interattivo è in grado di registrare e ricordare le icone per una loro successiva esecuzione, l'interfaccia presenta sequenze di immagini modificabili, l'ultima delle quali contiene le informazioni utili al designer.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Pygmalion: an executable electronic blackboard. In <http://acypher.com>, (consultato Aprile 2021).

## 2.3 William John Mitchell e i metodi di modellazione della forma architettonica

William John Mitchell in “The theoretical foundations of computer-aided architectural design” avvia una riflessione sullo sviluppo della progettazione architettonica assistita dal computer e teorizza tre “metodi di modellazione della forma architettonica” classificandoli in iconico, analogico e simbolico.<sup>8-9</sup>

Al modello **iconico** corrispondono le rappresentazioni bidimensionali e tridimensionali come piante, prospetti e modelli che comportano trasformazioni di scala come ingrandimenti e riduzioni. Osservando un modello iconico si è in grado di prevedere come sarà un edificio, identificando quindi immediatamente l'oggetto rappresentato.

Il modello **analogico**, invece, viene così definito da Mitchell:

«Un insieme di proprietà [...] viene utilizzato per rappresentare un altro insieme analogo di proprietà dell'elemento in fase di progettazione».<sup>10</sup>

Per spiegare meglio questa definizione occorre riportare l'esempio del modello di studio realizzato da Antoni Gaudí per la Sagrada Família dove corde e sacchi di juta riempiti di sabbia sono stati utilizzati per creare un modello analogico utile all'architetto al fine di studiare la configurazione statica dell'arco catenario utilizzato nella progettazione della basilica spagnola.

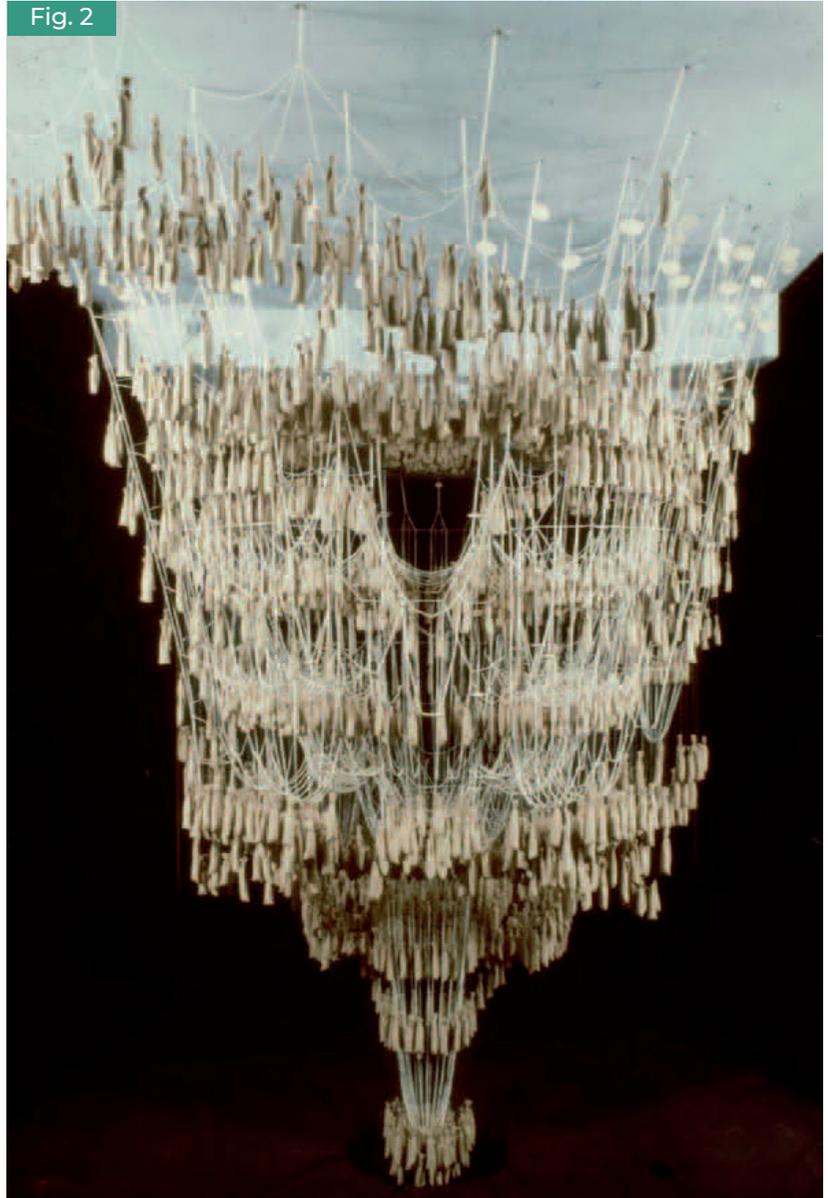
In questa rappresentazione i vettori di tensione sono espressi da corde, la cui forma e direzione sono analoghe al fenomeno fisico che rappresentano.

<sup>8</sup> William John Mitchell, *The theoretical foundation of computer-aided architectural design* in «Environment and Planning B: Planning and Design», vol. 2, 1975, pp. 127-150.

<sup>9</sup> Gabriela Celani, Carlos Eduardo, Verzola Vaz, *CAD scripting and visual programming languages for implementing computational design concepts: a comparison from a pedagogical point of view* in «International Journal of Architectural Computing», vol. 10, 2012.

<sup>10</sup> William John Mitchell, *The theoretical foundation of computer-aided architectural design* in «Environment and Planning B: Planning and Design», vol. 2, 1975, pp. 130.

Fig. 2

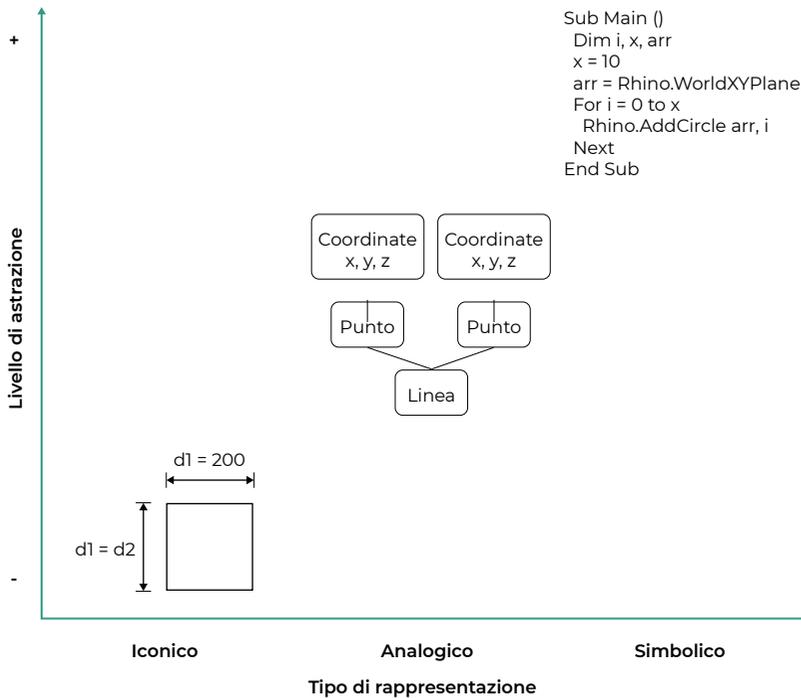


**Fig. 2** Fotografia di un modello realizzato con corde e sacchi di juta replica di quelli utilizzati da Gaudí per progettare la Sagrada Família. In The Gaudí Research Institute, <http://tgaudiri.org>.

Il modello **simbolico** utilizza parole, numeri e operatori matematici che vengono utilizzati principalmente per simulazioni o valutazioni delle prestazioni strutturali, acustiche, illuminotecniche e termiche, visualizzati come formule matematiche.

I tre metodi descritti presentano diversi livelli di astrazione: le rappresentazioni iconiche sono più vicine alla realtà mentre quelle simboliche sono astratte e le analogiche sono intermedie.

Fig. 3



Traslando questa logica di classificazione ai programmi di modellazione architettonica contemporanei, potremmo definire iconici i software in cui le relazioni parametriche possono essere esplicitate direttamente sulle rappresentazioni grafiche visibili a schermo, come avviene in alcuni software CAD o BIM.

Nella programmazione analogica, con medio livello di astrazione, individuiamo i software Visual Programming Language come Grasshopper per Rhinoceros o Dynamo per Revit; in entrambi gli esempi sono presenti icone utilizzate per rappresentare e manipolare indirettamente le entità di disegno.

I linguaggi di programmazione tradizionali, cioè testuali, hanno un alto livello di astrazione, utilizzano rappresentazioni simboliche, come testo e numeri, per descrivere ed eseguire operazioni di disegno. Per questo è necessaria un'ottima competenza per la loro gestione, a questa categoria fanno parte tutti i linguaggi di programmazione come Rhino Script, AutoLisp e VBA.

**Fig. 3** Tre metodi di rappresentazione del computational desing con differenti livelli di astrazione.

In Gabriella Celani, Carlos Eduardo, Verzola Vaz, CAD scripting and visual programming languages for implementing computational design concepts: a comparison from a pedagogical point of view in «International Journal of Architectural Computing», vol. 10, 2012, p. 125.

## 2.4 Confronto tra programmazione testuale e programmazione visuale

I linguaggi di scripting possono variare molto in termini di sintassi e struttura a seconda del software per i quali sono stati sviluppati. Alcuni esempi di linguaggi di scripting per modellatori CAD sono RhinoScript di Rhinoceros, MEL di Maya e MaxScript di 3ds Max.

Lo scripting si basa su regole sintattiche, una delle più note è la "sintassi del punto" in cui un punto, posto dopo il nome dell'oggetto, viene utilizzato per accedere alle sue proprietà, ad esempio `line.color = red`.

Lo svantaggio dello script testuale è la necessità di seguire regole molto rigorose, oltre a questo alcuni errori non vengono rilevati automaticamente e richiedono un impegno maggiore per essere individuati.

Il linguaggio di programmazione visuale, denominato anche programmazione schematica, consente agli utenti di creare codici spostando e connettendo insieme elementi grafici piuttosto che digitando una stringa.

Il VPL si basa sulla logica "**box and wire**", in cui l'organizzazione dei comandi e degli elementi è gerarchica, questi ultimi possono essere raggruppati e vi è la possibilità di digitare manualmente codici in alcuni componenti speciali.

L'informatica britannica Marian Petre e l'esperto di scienze cognitive Thomas Green hanno studiato gli aspetti psicologici dei linguaggi di programmazione e delle interfacce utenti, evidenziando che l'utilizzo di un ambiente visivo per lo sviluppo di programmi è più facile rispetto al tradizionale linguaggio di script.<sup>11</sup>

Tra i motivi che definiscono il vantaggio d'uso VPL vi è l'ordine di esecuzione libero in quanto gli utenti possono costruire il codice senza vincoli sequenziali, non è infatti necessario pianificare l'ordine delle azioni, inoltre non ci sono rigide regole sintattiche e gli errori o **bug** possono essere facilmente individuati.

In conclusione il testo di Green e Petre sostiene che la logica di manipolazione dei diagrammi visivi funziona come supporto per sviluppare e organizzare idee durante l'esecuzione, senza necessariamente seguire un percorso lineare.

<sup>11</sup> Thomas Green, Marian Petre, *Usability Analysis of Visual Programming Environments: a Cognitive Dimensions Framework*, in «Journal of Visual Languages and Computing», vol. 7, 1996, pp. 131-174.

**Bug:** Errore di progettazione o di programmazione di un computer.  
In <https://www.treccani.it>.

## 2.5 Grasshopper

Il focus della nostra ricerca verte soprattutto sull'utilizzo di Grasshopper, uno dei più avanzati e diffusi modellatori algoritmici, creato da David Rutten presso Robert McNeel & Associates nel 2007.

Nato inizialmente con il nome di Explicit History per la versione 4.0 del noto modellatore **NURBS** (acronimo di Non Uniform Rational B-Splines) Rhinoceros, Venne rinominato Grasshopper nel 2008 e rilasciato gratuitamente.

Dalla versione 6.0 di Rhinoceros per Windows è stato direttamente integrato all'interno del software.

Il suo successo e notorietà sono dovuti alla presenza di una vasta comunità di sviluppatori e utenti.

La comunità di utilizzatori di Grasshopper è molto numerosa e comprende studenti, professori e professionisti, il sito [www.grasshopper3d.com](http://www.grasshopper3d.com) è il punto di riferimento per la condivisione di lavori, problematiche e domande nei relativi forum dedicati.

I feedback degli utilizzatori sono stati indispensabili per la correzione di errori e bug nel corso degli anni, quindi, le potenzialità di Grasshopper sono aumentate notevolmente considerando i numerosi plugin rilasciati da programmatori indipendenti che accrescono così le funzionalità del software.

Tra i più noti plugin creati da sviluppatori esterni riportiamo **Weaverbird** dell'architetto Giulio Piacentino che consiste in un pacchetto di estensioni che facilitano la modellazione, modifica e suddivisione di superfici geometriche soprattutto in ambito di pannellizzazione.

**Kangaroo** è invece un solver interattivo e simulatore di fisica per l'ottimizzazione di geometrie e **Ladybug Tools** è un utile strumento per realizzare analisi solari e ambientali.

Infine l'interoperabilità del software permette di dialogare con altri programmi esterni anche attraverso una interazione in tempo reale.<sup>12-13-14</sup>

### Interfaccia e logica di funzionamento

In Grasshopper, l'area di lavoro è chiamata canvas ed è l'editor in cui si definisce e si modifica la rete di connessioni tra comandi e parametri.

La soprastante barra dei componenti raccoglie i comandi identificabili con icone.

<sup>12</sup> Weaverbird, <https://www.giuliopiacentino.com>, (consultato Gennaio 2021).

<sup>13</sup> Ladybug Tools, <https://www.ladybug.tools>, (consultato Gennaio 2021).

<sup>14</sup> Kangaroo3d, <http://kangaroo3d.com>, (consultato Gennaio 2021).

La disposizione dei componenti sul canvas e la loro connessione manuale tramite connettori lineari, costituiscono il principio con cui viene a crearsi il codice, nonché la logica fondativa del funzionamento di Grasshopper.

La creazione di una forma si sviluppa in modo schematico, la geometria infatti non è direttamente modellata. Grasshopper memorizza e comunica le istruzioni che generano la geometria su Rhinoceros che le fa visualizzare in forma di anteprima sulla sua interfaccia. Quando l'utente modifica i valori, slider o altri parametri variabili presenti sul canvas di Grasshopper, la geometria viene immediatamente aggiornata nella finestra di Rhinoceros, l'utente ha così un feedback visivo simultaneo del risultato.

Gli errori sono facilmente individuabili perché un'errata connessione o compilazione porta il software a segnalare il comando errato con un colore rilevando l'incompletezza delle informazioni o l'impossibilità di esecuzione.

«La sequenza logica di esecuzione può essere pensata come la costruzione di una storia [...]. Il flusso di comandi deve essere immaginato come un fluido che scorre attraverso i componenti da sinistra verso destra».<sup>15</sup>

Per meglio chiarire il metodo di lavoro del modellatore VPL Grasshopper, viene qui mostrato come si genera una geometria semplice: un cilindro.

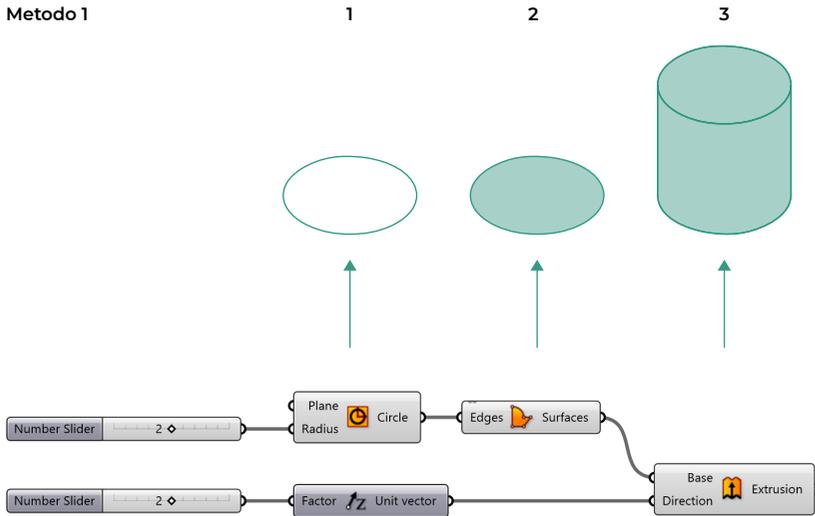
Sono molteplici le alternative per modellare un cilindro infatti questo può essere creato tramite estrusione verticale di un cerchio oppure utilizzando l'apposito comando "cylinder"(fig. 4).

In generale non esiste una procedura ottimale rispetto alle altre, il software di David Rutten permette di ottenere lo stesso risultato con metodi e percorsi differenti a seconda delle esigenze anche se è preferibile comporre uno script più breve possibile per favorire la velocità di calcolo.

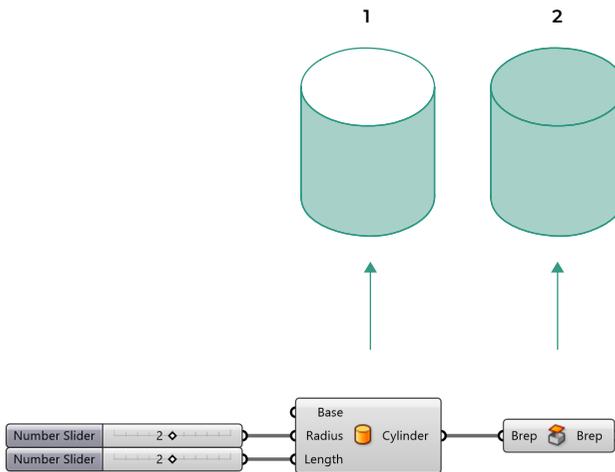
<sup>15</sup> Arturo Tedeschi, *AAD algorithms aided design*, Le Penseur, 2014, p. 59.

Fig. 4

Metodo 1



Metodo 2



Questo semplice esempio serve a dimostrare che nonostante i risultati ottenuti siano due cilindri perfettamente uguali, i codici che li hanno generati sono differenti, visibili ed editabili in qualsiasi momento.

In questo modo un progettista può trasferire il proprio modello ad un altro operatore e quest'ultimo sarà in grado di leggere e comprendere il flusso di lavoro nonché la logica che ha portato alla genesi di una determinata forma.

Fig. 4 Due metodi alternativi per modellare un cilindro su Grasshopper. Il processo differisce ma il risultato non cambia. Elaborato personale.

Grasshopper tenta di avvicinare l'utente alla logica operativa del computer senza richiedere conoscenze teoriche sulla programmazione.

La programmazione nodale favorisce il ragionamento di scomposizione di un problema, pensare una stanza secondo i suoi parametri (altezza, profondità, larghezza) per costruire il codice. Il progettista successivamente valuta l'output accettandolo o modificando i parametri.

Un'operazione molto semplice e comune, come la creazione di una retta su un qualsiasi software CAD, avviene selezionando l'apposita icona e indicando successivamente i punti estremi che la compongono con click sull'area di lavoro. Quando disegniamo una geometria, infatti, non compiliamo un codice di programmazione testuale ma clicchiamo delle icone che codificano dei comandi. In questo caso l'interfaccia si pone tra l'utente e il codice nativo del software semplificando e permettendo a tutti gli utenti di compiere un determinato comando.

I parametri non specificati dall'utente usano valori predefiniti come, per esempio, le coordinate di posizione iniziali. Infine Grasshopper ha componenti già pronti che generano automaticamente numeri casuali e sequenze numeriche, come le serie di Fibonacci, utili per la progettazione generativa.

Attraverso la generazione di un oggetto geometrico, tramite script visuale di Grasshopper, si crea una famiglia di oggetti che fanno riferimento allo stesso codice sorgente e condividono la stessa genesi.

I tre cilindri riportati nel seguente schema differiscono per raggio, altezza e volume ma nascono tutti dallo stesso codice.<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Andrea Casale, Michele Calvano, *Represented models and typological algorithms: the role of parametric models for the design of product* in Paolo Cascone, Elena Ciancio, Flavio Galdi, Andrea Giglio (a cura di), *Computational Morphologies*, Springer International Publishing, 2018, pp. 63-67.

Fig. 5

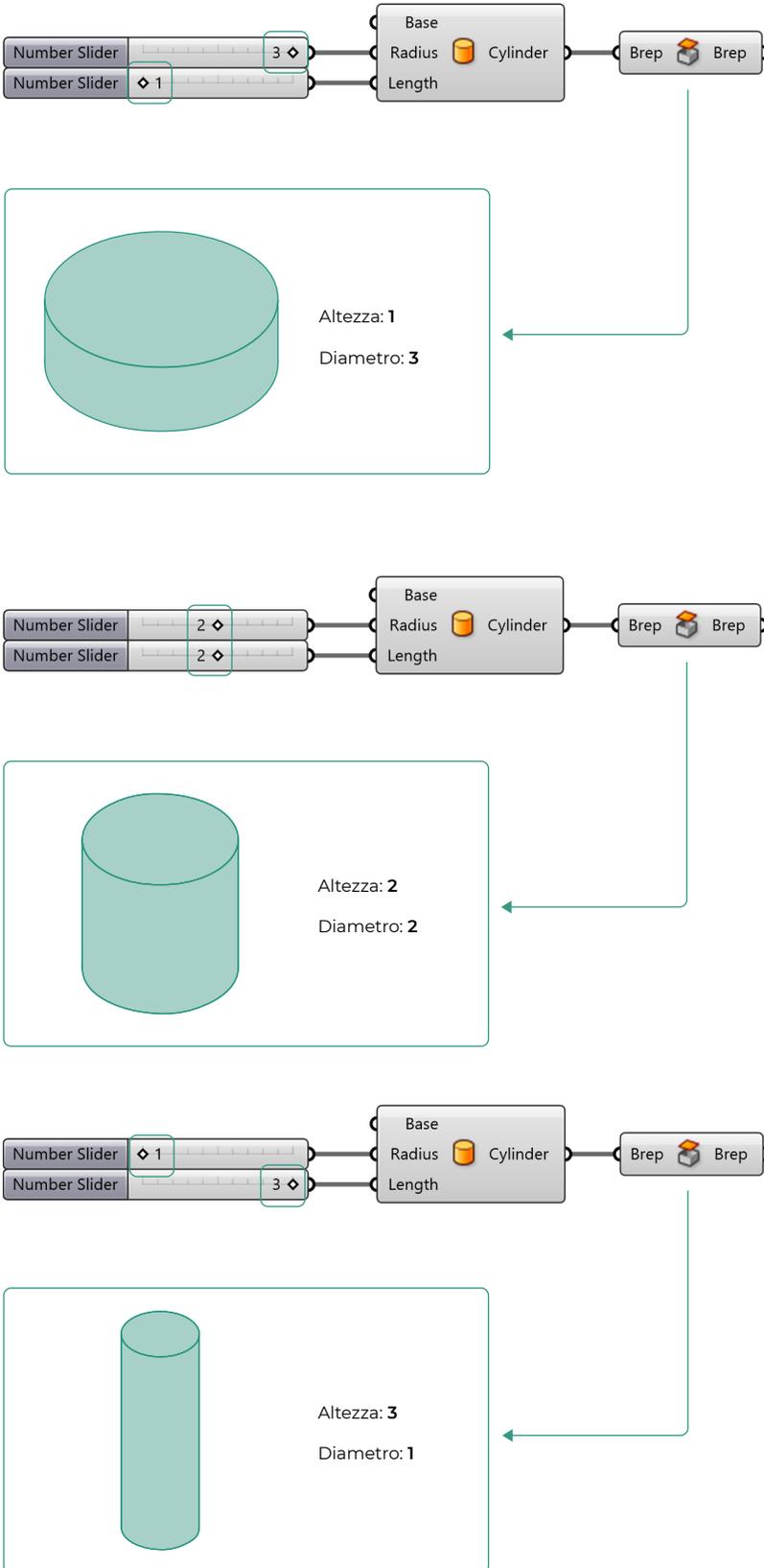


Fig. 5 Differenti geometrie fanno riferimento ad un unico codice sorgente, la manipolazione dei parametri di quest'ultimo genera output differenti. Elaborato personale.

# 03

## La nuova frontiera della progettazione: il Generative Design

di  
Mohamed Yasser Hariss

L'innovazione digitale introduce una serie di nuovi strumenti utili alla professione dell'architetto facilitando le mansioni più complesse e dispendiose di tempo. Il Generative design è uno degli strumenti che negli ultimi anni sta entrando a far parte dell'evoluzione progettuale architettonica garantendo una collaborazione più efficiente fra computer e uomo. Attraverso l'uso di specifici algoritmi di Machine Learning, come gli algoritmi evolutivi, il Generative Design è in grado di risolvere problemi, apparentemente complessi e ripetitivi, esaminando rapidamente migliaia di ipotesi progettuali al fine di ottimizzare uno o più obiettivi.

Light Rider, realizzata nel 2016 è la prima moto elettrica al mondo stampata in 3D ad opera della APWorks del gruppo Airbus. L'esoscheletro è il risultato dell'uso del Generative Design. In <https://www.thedigeon.com>.



APICRIS  
S.M.A.R.T.

ELOS M 400

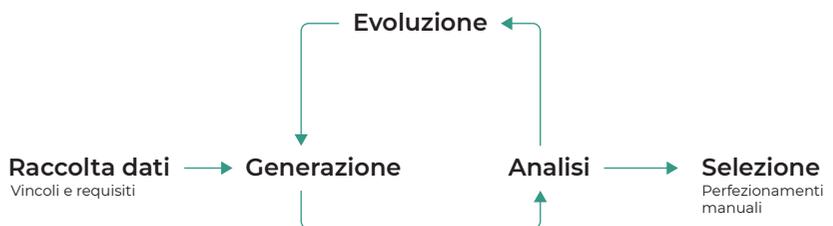
Lee Rubber.co.th

### 3.1 Il Generative Design

Non esiste una definizione univoca di Generative Design essendo un concetto ancora in continua evoluzione. Le diverse teorie presentano però delle caratteristiche che le accomunano. In sintesi alle definizioni riportate di seguito, in ambito architettonico il Generative Design, inteso come strumento per la progettazione computazionale, può essere definito come un processo iterativo dove delle regole algoritmiche vengono applicate al fine di ottimizzare uno o più obiettivi dettati dal designer.

Fig. 1

#### Generative Design



Verso la fine degli anni 70 del Novecento, William John Mitchell, uno dei primi a concepire la logica computazionale, descrive il Generative Design come un sistema capace di generare soluzioni ottimali ad un determinato problema.<sup>1</sup> Negli anni a seguire il termine ha assunto diversi significati, anche se solo nell'ultimo decennio si è vista una riscoperta del Generative Design, favorita dallo sviluppo dell'intelligenza artificiale che ha permesso di scoprire nuovi campi di utilizzo. Questo approccio ha aperto una serie di possibilità, non solo in ambito architettonico, attraverso l'uso di nuovi strumenti e metodologie atte a svolgere compiti di una certa complessità.

**Fig. 1** The generative design workflow. Principio di funzionamento del Generative Design. In <https://medium.com>.

<sup>1</sup>William John Mitchell, *The Theoretical Foundation of Computer-Aided Architectural Design* in «Environment and Planning B», vol. 2, 1975, pp. 127-150.

Celestino Soddu, uno dei pionieri italiani del Generative Design e professore del Politecnico di Milano, già dal 1986 realizza software di Intelligenza Artificiale e definisce questo processo con il nome di "Generative Art".

«L'Arte Generativa realizza eventi artificiali che sono unici ed irripetibili. L'unicità e l'irripetibilità sono infatti intimamente legate. Così come avviene in natura, ogni evento realizzato tramite codici generativi vive una sua vita artificiale [...]. È possibile riconoscere negli oggetti artificiali che produciamo attraverso processi generativi, l'armonia e la bellezza degli eventi naturali [...]».<sup>2</sup>

Il professor Soddu associa il processo generativo alla bellezza della natura grazie alla quale è possibile produrre e trasformare una serie infinita di soluzioni uniche e irripetibili dettate da un codice come nelle mutazioni naturali. L'architettura si sviluppa così da una mimesi degli organismi viventi dove forma e aspetto mutano attraverso una progressiva evoluzione dei parametri che li determinano.

Nella pagina ufficiale della software house Autodesk, il Generative Design viene definito come un "processo di esplorazione del design" dove un software generativo prende in input dei parametri di design insieme a degli obiettivi per generare una serie di possibili soluzioni alternative ad un determinato problema. Il fine è quello di ottimizzare questo processo per testare quali soluzioni soddisfano o meno gli input di progetto.

Scott Reese, vicepresidente senior dell'area manifattura, costruzione e produzione Autodesk, pone un chiarimento su cosa sia il Generative Design, tecnologia che viene spesso confusa con l'ottimizzazione topologica. Quest'ultima tiene già in considerazione una geometria che di base è stata ottimizzata da ingegneri e che rappresenta quindi la miglior soluzione ad un problema.

«Qualsiasi progetto sviluppato con mezzi tradizionali rappresenta, di base, la migliore soluzione possibile, ipotizzata da un ingegnere per un determinato problema».<sup>3</sup>

Attraverso un'ottimizzazione topologica, il risultato sarebbe una geometria leggermente migliorata rispetto ai vincoli geometrici di base. Con il Generative Design, contrariamente, non ci si pone un vincolo formale ma uno o più limiti prestazionali che si vogliono

<sup>2</sup> Celestino Soddu (a cura di), *Argenia, la naturalità di un progetto generativo*, atti della Conferenza internazionale Generative Art '98, 16-18 Dicembre 1998, Milano, p. 8.

<sup>3</sup> Autodesk, <https://redshift.autodesk.it> (consultato Marzo 2021).

raggiungere senza sapere quale possa essere il risultato finale. Da questo punto di vista non vengono tenute in considerazione le criticità legate alla fabbricazione di geometrie non convenzionali che difficilmente il cervello umano sarebbe in grado di pensare.

Nonostante il tema del Generative Design sia emerso maggiormente nell'ultimo decennio non è un concetto nuovo e in architettura varie tecniche generative di ricerca della forma esistevano molto prima dell'avvento del digitale.

È chiaro quindi come il processo generativo non sia impossibile da raggiungere senza gli strumenti avanzati che abbiamo oggi ma è anche vero che senza di essi i risultati sono condizionati dal singolo soggetto che impiega il proprio tempo e le proprie capacità per ottenere il miglior risultato. I fattori in gioco sono spesso limitanti in quanto le possibilità di esplorare molteplici soluzioni risultano essere condizionate dalla carenza di tempo e dall'esperienza del singolo professionista nel proprio campo di competenza.

Con la digitalizzazione e l'automazione è diventato sempre più rilevante il concetto di design generativo per creare soluzioni complesse limitando l'esigenza di eseguire compiti ripetitivi. Il beneficio dell'automazione va ben oltre la semplice ripetizione permettendo di svolgere compiti complessi che sarebbero impossibili da raggiungere per l'essere umano.<sup>4</sup>

I progettisti usano questo processo evolutivo applicando un pensiero progettuale biologicamente ispirato per generare diversità nelle forme architettoniche. Oggi questi strumenti per la progettazione parametrica offrono una tecnologia avanzata per analizzare in modo matematico una serie di dati quantificabili come la radiazione solare incidente, la quantità di materiale utilizzato o il costo.

<sup>4</sup>Alex Lobos (a cura di), *Applying Generative Systems to Product Design*, atti della 22a Conferenza Internazionale Generative Art, 19-21 Dicembre 2019, Roma, Italia.

## 3.2 Dibattiti e vantaggi

La progettazione architettonica e la generazione della forma è frequentemente accompagnata da dibattiti sulla legittimità del suo approccio progettuale, ponendo come questioni fondamentali il rapporto che intercorre tra funzione e forma, contesto, esigenze degli utenti e costi. Le critiche vertono soprattutto sull'approccio iniziale al progetto architettonico le quali ritengono che debba mantenere un maggior legame con il contesto e i suoi utenti. Si rischierebbe di avere così un'architettura con qualità spaziali limitate e con una poca integrazione con il contesto urbano.<sup>5</sup>

Sono molti gli architetti scettici nei confronti di questi metodi di progettazione non convenzionali. Si teme infatti la perdita del controllo della progettazione, della materialità e della funzionalità. Gli aspetti negativi dell'architettura contemporanea vengono associati al design generativo, tuttavia, con il Generative Design è possibile applicare tecniche usate molto prima dello sviluppo digitale in maniera più veloce ed intelligente, per esempio la triangolazione.

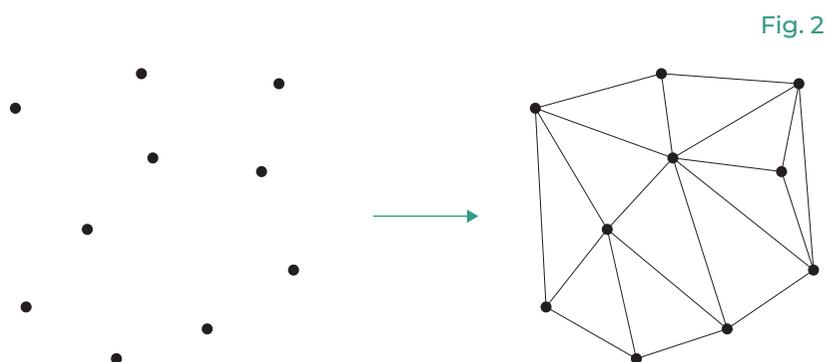


Fig. 2

Data una serie di punti sul piano bidimensionale, la triangolazione avviene collegando i punti a formare dei triangoli senza che le linee si incrocino. I punti rappresentano i vertici dei triangoli mentre le linee i lati. Nel design computazionale questo metodo, chiamato triangolazione di Delaunay, avviene ricavando le circonferenze circoscritte ai triangoli passanti per i rispettivi punti.

<sup>5</sup> Asterios Agkathidis, *Generative Design: Form-finding Techniques in Architecture*, Laurence King Publishing, 2016, pp. 8-9.

Fig. 2 Principio di funzionamento della triangolazione, Elaborato personale.

«Ritengo, personalmente, che il design generativo rappresenti l'evoluzione più entusiasmante a cui l'industria manifatturiera abbia assistito negli ultimi 20 anni».<sup>6</sup>

Il Generative Design non è solo un processo che facilita l'esecuzione di determinati problemi, è anche un supporto alla creatività e l'innovazione, ed è per questo che molti dei progetti degli ultimi decenni sono riusciti a superare una certa standardizzazione grafica e concettuale nelle tipologie edilizie. Le geometrie che ne escono risultano più varie nonostante siano spesso complesse e difficili da gestire sia dal punto di vista della rappresentazione che della fabbricazione. Queste geometrie sono facilmente riprodotte attraverso software digitali ma richiedono un controllo maggiore nelle fasi successive all'ideazione.

Ci si domanda fino a che punto è possibile affidarsi a strumenti se poi ciò che viene rappresentato non è di facile interpretazione e quali siano i benefici per i quali optare per questo processo progettuale.

I vincoli di base risiedono nel modo in cui viene utilizzato questo strumento, spesso associato all'uso inappropriato o sbagliato di un software per risolvere un particolare compito.

Il Generative Design per come è concepito ora non è la risposta a qualsiasi problema ma è un ottimo strumento che, se utilizzato in modo adeguato, può portare diversi benefici. Ispirandosi alla biodiversità, dettata dalla dominanza di specie, il design generativo riesce a gestire una serie di calcoli complessi, spesso ripetitivi, che l'essere umano non sarebbe in grado di fare, i risultati non ottimali vengono poi scartati per lasciare spazio a quelle soluzioni che secondo il computer sono dominanti in quanto a performance.

Un altro vantaggio è legato alla gestione delle geometrie e dei pattern complessi rispecchiando in modo quasi analogo la creazione casuale di forme come succede in natura, dalle quali il progettista può trarre anche ispirazione stimolando la creatività. In entrambi i casi il risultato è guidato da una visione globale iniziale da parte del designer che pone i limiti entro i quali vengono poi generate le forme ottimizzate.<sup>7</sup>

<sup>6</sup>Autodesk, <https://redshift.autodesk.it>, (consultato Aprile 2021).

<sup>7</sup>Alex Lobos (a cura di), *Applying Generative Systems to Product Design*, atti della 22a Conferenza Internazionale Generative Art, 19-21 Dicembre 2019, Roma, Italia.

### 3.3 Innovazione digitale

L'utilizzo di strumenti innovativi nella disciplina architettonica legati al Generative Design ha come scopo principale quello di ricercare forme uniche che possano trovare un bilancio fra estetica e funzionalità. Questo processo avviene attraverso un software di calcolo al quale il progettista cede una parte di controllo nella fase progettuale in modo da automatizzare un processo che per il designer sarebbe dispendioso in termini di tempo e fattibilità.

È uno dei tanti metodi di esplorazione del design, il quale utilizza un modello parametrico di base per poi valutare le prestazioni in uscita dal software. Inizialmente il progettista possiede un'idea astratta di quale possa essere la geometria finale per poi costruirci dietro tutto il processo che porta alla definizione della forma. Justin Matejka e i suoi collaboratori, nella CHI Conference on Human Factors in Computing Systems del 2018, affermano che:

«Il design generativo varia i parametri della definizione del problema mentre il design parametrico varia direttamente i parametri della geometria».<sup>8</sup>

Il design generativo aspira a esplorare una serie di soluzioni che soddisfano prestazioni sia di design che strutturali mentre l'ottimizzazione topologica mira alla ricerca di un design ottimale che soddisfi le esigenze dei progettisti.

In generale il processo della progettazione generativa può essere sintetizzato in 3 fasi:

**Fase 1.** Definizione dei parametri di base del progetto e degli obiettivi.

**Fase 2.** Elaborazione delle possibili soluzioni che soddisfano gli obiettivi posti, attraverso un software di calcolo generativo.

**Fase 3.** Analisi e scelta della geometria migliore.<sup>9</sup>

Sono diversi i software in commercio che, oltre all'ambito architettonico, applicano questa logica generativa nella progettazione di varie strutture come automobili e aerei.

<sup>8</sup> Justin Matejka, Michael Glueck, Erin Bradner, Ali Hashemi, Tovi Grossman, George Fitzmaurice (a cura di), *Dream Lens: Exploration and Visualization of Large-Scale Generative Design Datasets*, atti della 36a Conferenza Internazionale ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 21-26 Aprile 2018, Montréal, Canada.

<sup>9</sup> Matthew McKnight (a cura di), *Generative Design: What it is? How is it Being Used? Why it's a Game Changer!*, atti della International Conference on Design and Technology, 5-8 Dicembre 2016, Geelong, Australia.

Nell'architettura i software evolutivi, chiamati anche solver evolutivi, si possono distinguere in software di ottimizzazione mono-obiettivo e multi-obiettivo. Come suggeriscono i termini, un software di ottimizzazione mono-obiettivo ha il limite di poter analizzare un problema alla volta concentrandosi su un compito specifico. Il software multi-obiettivo ha invece la peculiarità di analizzare diversi problemi simultaneamente applicando una logica gerarchica di quelle che sono le soluzioni ottimali, confrontando i diversi output per ogni singolo obiettivo.

Fig. 3

### Mono-obiettivo



### Multi-obiettivo

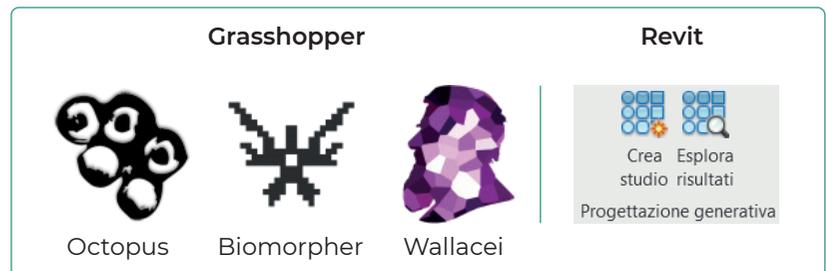


Fig. 3 Schema rappresentativo di esempi di solver genetici mono-obiettivo e multi-obiettivo. Elaborato personale.

## 3.4 Algoritmo genetico

I software evolutivi utilizzano specifici algoritmi, chiamati algoritmi genetici, che elaborano un elevato numero di dati e sono basati su un approccio bio-ispirato e un meccanismo di selezione naturale così come accade nell'evoluzione biologica.

Di base non esiste un algoritmo evolutivo migliore di un altro, considerando la complessità con la quale il solver deve controllare le possibili soluzioni da ottimizzare. È opportuno, pertanto, operare in maniera mirata al singolo caso studio adeguando i parametri con il quale l'algoritmo opera nelle varie fasi.

I diversi algoritmi genetici seguono una logica esecutiva che li accomuna. Vengono scelte arbitrariamente un numero di soluzioni che corrispondono alla popolazione iniziale, attraverso una serie di passaggi ciclici vengono individuate le soluzioni più performanti alle quali viene poi dato un ordine gerarchico per poi essere utilizzate nel ciclo successivo e produrre a loro volta nuove soluzioni. Questi cicli sono chiamati generazioni ma è opportuno definire le diverse fasi con le quali operano gli algoritmi genetici per comprenderne le dinamiche.

1. Definizione dei fitness: obiettivi che il solver deve raggiungere (area, peso, costi...).
2. Definizione della logica dei genomi: parametri che controllano e modificano la geometria.
3. Generazione casuale della prima popolazione.
4. Analisi dei fitness per ogni soluzione presente nella popolazione.
5. Selezione delle soluzioni migliori da utilizzare per la popolazione successiva.
6. Generazione della nuova popolazione partendo dalle soluzioni più performanti della generazione precedente attraverso la mutazione dei genomi o il crossover (scambio dei genomi fra due soluzioni).
7. Ripetizione ciclica dal punto 4 fino al termine del calcolo.<sup>10</sup>

Il calcolo termina quando vengono analizzate tutte le soluzioni di una popolazione per tutte le generazioni, definite prima di eseguire il calcolo. Impostare correttamente i parametri in input del solver sia per gli obiettivi da raggiungere che per l'algoritmo è fondamentale per ottenere risultati ottimizzati.

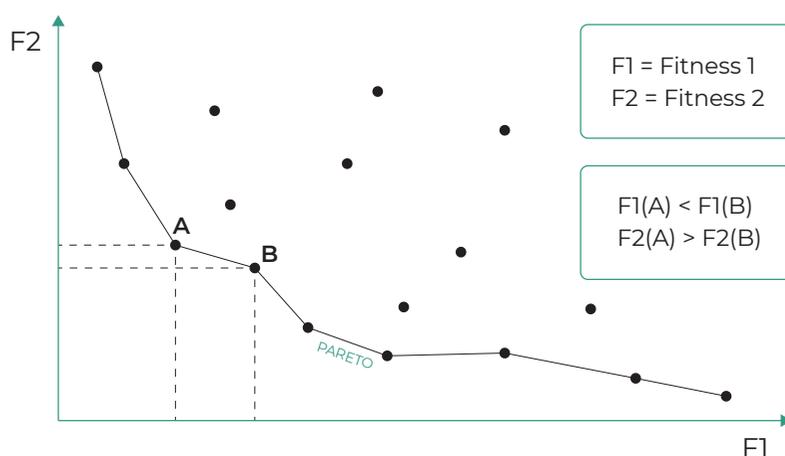
<sup>10</sup>Christina Cogdell, *Toward a Living Architecture?: Complexism and Biology in Generative Design*, University of Minnesota Press, 2018, p. 17.

## Pareto Front

Secondo i principi legati alla progettazione architettonica, non è teoricamente corretto operare in fasi separate volte ad ottimizzare specifici obiettivi. Se per esempio si pensa separatamente alla forma e successivamente alle caratteristiche dell'involucro come materiali, aperture o accessi, sarà poi necessario ritornare alla definizione della forma per apportare alcune modifiche. Queste fasi di manipolazione geometrica sono generalmente svolte dal progettista in fasi alternate o simultanee a seconda delle necessità.<sup>11</sup>

Nella risoluzione di problemi tramite solver multi-obiettivo, l'intento è quello di ottimizzare i fitness contemporaneamente, ricavando soluzioni spesso contraddittorie. L'ottimizzazione avviene in modo differente nei diversi algoritmi evolutivi, tuttavia, la maggior parte di essi presenta una caratteristica comune di restituzione dei dati. Il Pareto Front, o Fronte di Pareto, denota le soluzioni, ricavate dalla simulazione, che non sono dominate da altre soluzioni. Esse rappresentano quelle soluzioni migliori su almeno un obiettivo rispetto alle altre. Non è possibile inoltre migliorare il fitness di una soluzione presente nel Pareto senza danneggiarne conseguentemente un altro. La scelta finale spetta comunque al progettista che, a seconda dell'esperienza e della propria sensibilità, sceglierà la soluzione più idonea.

Fig. 4



<sup>11</sup>Xavier Marsault, *Eco-Generative Design for Early Stages of Architecture*, ISTE Ltd, 2018, pp. 62-66.

**Fig. 4** Grafico cartesiano del Pareto Front avente due obiettivi (F1 e F2).

### 3.5 Applicazioni della progettazione generativa

#### Airbus

La Airbus, azienda multinazionale costruttrice di aeromobili, ha sviluppato una partizione interna di un A320 attraverso l'uso del Generative Design della Autodesk per determinare con precisione quale sarebbe stata la resa strutturale utilizzando meno materiale.

A parità di sicurezza, in quanto obiettivo primario, sono riusciti a raggiungere un rapporto fra peso e solidità ottimale attraverso una maglia reticolare scelta fra le 10.000 configurazioni che il software generativo ha elaborato.

Fig. 5

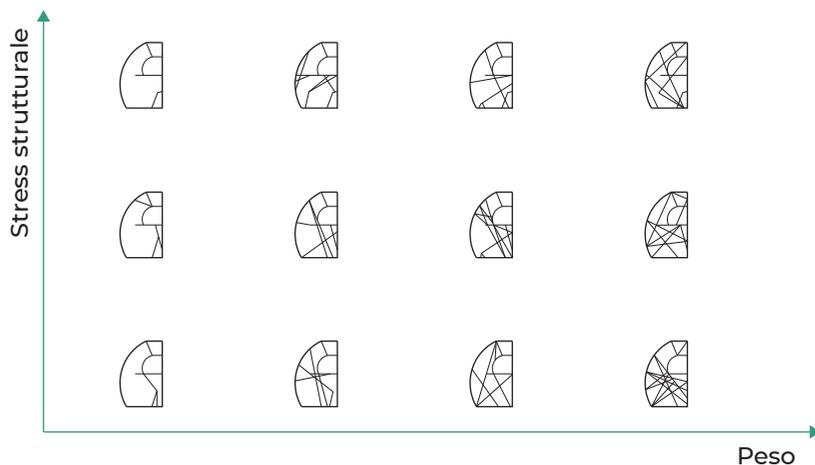


Fig. 5 Grafico cartesiano che illustra alcune soluzioni ottimizzate della partizione dell'Airbus A320 rispetto agli obiettivi (stress strutturale e peso). Elaborato personale.

Fig. 6 Partizione bionica dell'aereo Airbus A320 in <https://redshift.autodesk.it>.

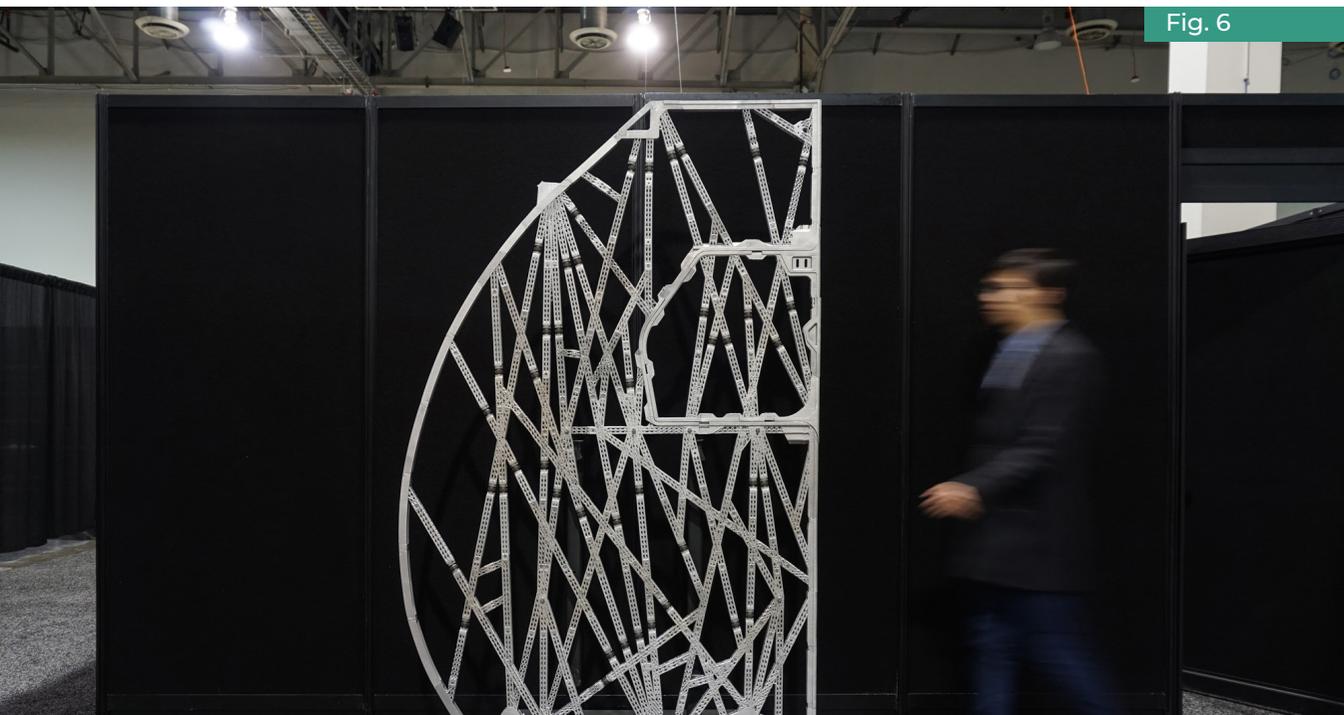


Fig. 6

Bastian Schaeffer, ingegnere della Airbus, afferma:

«Grazie al Generative Design, siamo riusciti a progettare una paratia del 45% più leggera di quella che si trova attualmente negli altri aerei. Questo consente di risparmiare 30 kg per ogni paratia, ossia 500 kg per l'intero aereo.»<sup>12</sup>

La riduzione del peso dell'aereo comporta un risparmio sul carburante che secondo le stime, per la sola ottimizzazione della partizione, ammonta a quasi 13 tonnellate di cherosene all'anno. I benefici che si ottengono non sono solo correlati ad un consumo ridotto di materiale, con conseguente risparmio di denaro, ma anche ad un calo dell'impatto ambientale.

## Autodesk MaRS Office

Diversamente dall'ingegneria, gli aspetti qualitativi di un edificio come l'estetica non possono essere quantificati rendendo il processo progettuale più articolato. Il design generativo pone quindi grandi prospettive nel campo dell'architettura preservando il rapporto collaborativo che intercorre fra macchina e progettista.

Un esempio rilevante in architettura è l'ufficio MaRS della Autodesk a Toronto, un edificio di tre piani che si estende per più di 5.000 metri quadrati dove l'utilizzo di un approccio computazionale di tipo generativo ha permesso di generare una moltitudine di soluzioni spaziali per soddisfare al meglio il benessere degli utenti. Partendo da un volume edificato che pone già dei vincoli di base come il perimetro, l'area, il posizionamento delle finestre o i pilastri strutturali. Gli obiettivi da raggiungere sono stati elaborati singolarmente con l'utilizzo di algoritmi specifici per risolvere ogni singolo problema. I risultati ottenuti per ogni obiettivo sono stati poi confrontati fra di loro e disposti gerarchicamente in base alle performance.

Il processo computazionale segue dei passaggi specifici grazie al quale l'algoritmo di ottimizzazione riesce a tradurre gli obiettivi spaziali in output quantificabili.

<sup>12</sup> Autodesk, <https://www.autodesk.it>, (consultato Maggio 2021).

1. Definizione delle aree di competenza per lo sviluppo dei locali.
2. Taglio delle aree con un asse passante per il centro

della geometria.

3. Individuazione approssimata dei punti corrispondenti ai centri dei locali.

4. Movimento dei punti nello spazio prima lungo la linea centrale poi perpendicolarmente all'asse.

5. Partizione degli spazi attraverso una logica Voronoi.

6. Divisione dei locali con una linea posta ad una determinata distanza da uno dei lati.

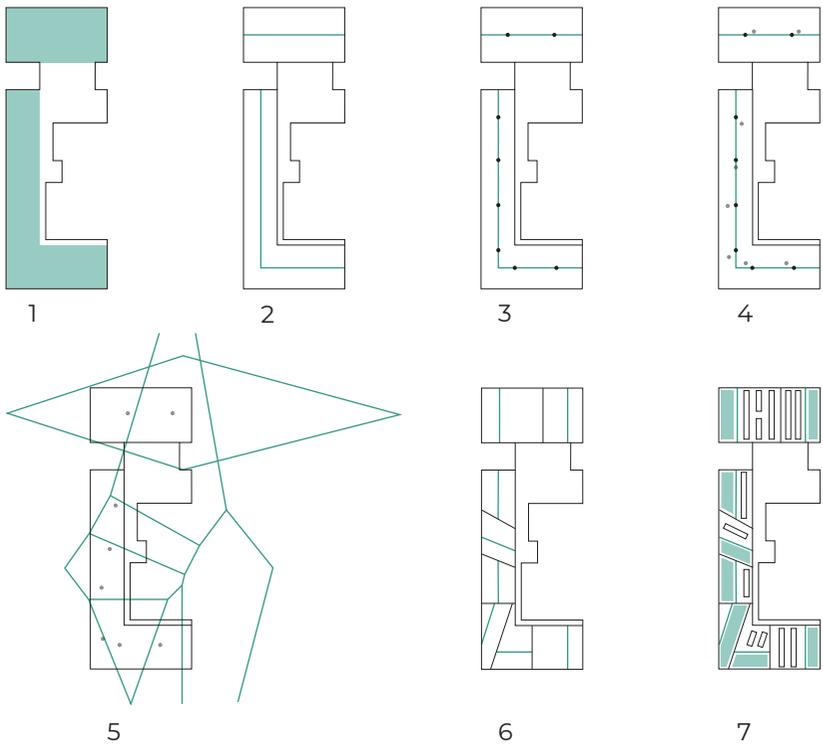
7. Sistemazione delle scrivanie nelle aree lavoro e delle aree relax secondo i vincoli già presenti (pilastri, finestre e altro).

Anthony Hauck, Direttore della Strategia di Prodotto presso la Autodesk AEC Generative Design, afferma:

«Crediamo che ci possano essere buone soluzioni di design che non vengono mai trovate perché sono laboriose da scoprire[...]».<sup>13</sup>

Il Generative Design è in grado di esplorare infinite soluzioni avendo come obiettivo non la ricerca della migliore soluzione esistente al problema ma la soluzione che più soddisfa i requisiti funzionali ed estetici personali tra quelli esplorati.

Fig. 7



<sup>13</sup> Redshift, <https://redshift.autodesk.it>, (consultato Maggio 2021).

**Fig. 7** Step del processo computazionale dell'ufficio MARs della Autodesk a Toronto. Elaborato personale tratto da <https://www.autodesk.com>.

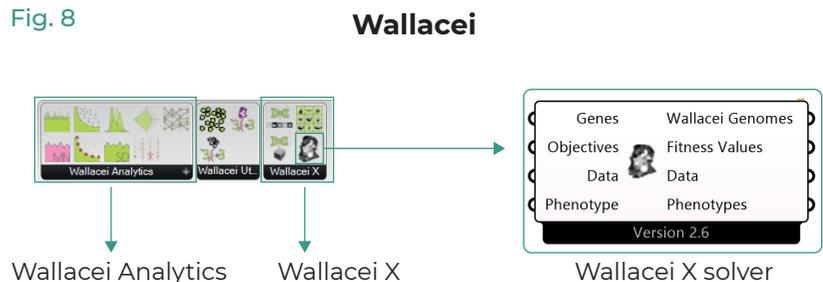
### 3.6 Wallacei

Wallacei, nome scelto in riconoscimento di Alfred Russell Wallace per la sua proposta alla teoria dell'evoluzione per selezione naturale, è un solver evolutivo di simulazione in grado di fornire all'utente una serie di informazioni attraverso l'utilizzo di strumenti analitici altamente dettagliati. I dati al servizio degli utenti possono essere analizzati mediante metodi di selezione specifici attraverso le diverse fasi di simulazione. Comprese le dinamiche di impostazione del problema di progetto e analizzando i risultati emessi dal software, è possibile selezionare la soluzione o le soluzioni desiderate ricostruendo il fenotipo della popolazione.

Il plugin gratuito comprende Wallacei Analytics, una serie di comandi utili ad analizzare le diverse fasi di simulazione del solver, e Wallacei X, il motore evolutivo dal quale vengono prodotti gli output.

Nell'interfaccia utente è possibile comprendere meglio il modo in cui opera il solver e ottenere un'approfondita rappresentazione dei valori numerici emessi, individuando le soluzioni ottimizzate. La versione in uso è la V2.6 e sebbene Wallacei sia stato ottimizzato per Rhino 6, il plugin può essere installato anche in Rhino 5 e in Rhino 7 WIP.

Fig. 8



Sotto la direzione del Dottor Michael Weinstock, fondatore e direttore del programma Emergent Technologies and Design nella Graduate School dell'Architectural Association, Mohammed Makki conduce una ricerca sugli strumenti di risoluzione dei problemi di progettazione utilizzando il calcolo evolutivo rivolgendo l'attenzione principalmente sulla formulazione del problema, l'analisi dei risultati emessi e la selezione delle soluzioni

Fig. 8 Plugin e solver di Wallacei per Grasshopper.

ottimizzate.

Insieme a Milad Showkatbakhsh, laureato presso il Pratt Institute, Mohammed Makki rilascia la prima versione di Wallacei nel Gennaio del 2018. Questa versione comprendeva una serie di strumenti analitici (Wallacei Analytics). Infine con l'unione di Yutao Song nel team, laureato presso l'Emergent Technologies and Design Program dell'Architectural Association, Wallacei diventa un motore evolutivo completo compreso di interfaccia utente dove è possibile condurre le analisi e la selezione al suo interno.

Iniziato come un set di strumenti primitivi, Wallacei si è evoluto in un motore robusto per i progettisti di tutti i livelli di competenza.<sup>14</sup>

Wallacei X è uno dei tanti motori evolutivi multi-obiettivo disponibili per Grasshopper e la scelta di questo specifico solver è dovuta alla chiarezza delle informazioni di natura tecnica del plugin e ad un'interfaccia organizzata secondo le specifiche fasi di analisi del problema progettuale.

Inizialmente la comprensione non è immediata per coloro che non hanno una sufficiente conoscenza delle principali nozioni informatiche con la quale opera il solver, infatti, l'algoritmo evolutivo è alla base del quadro conoscitivo.

<sup>14</sup> Wallacei, <https://www.wallacei.com>, (consultato Aprile 2021).

# Sezione 2

## Temi progettuali



# 04

## La riscoperta del legno

di  
Riccardo Grecu

Il legno è un materiale da costruzione che vanta una ricca storia, ha profonde radici culturali e fornisce allo stesso tempo prospettive interessanti per il futuro grazie all'impiego di nuove tecnologie, macchinari e strumenti digitali avanzati.

A fronte dei rapidi progressi tecnologici che stiamo vivendo e delle grandi sfide ambientali che anche l'architettura sta affrontando, le virtù del legno sottolineano quanto esso non sia obsoleto o inferiore rispetto ad altri materiali, anzi le sue proprietà, lo configurano come uno dei materiali da costruzione più vantaggiosi dal punto di vista della sostenibilità ambientale.

Nine Bridges Country Club, progetto di Shigeru Ban Architects, l'adozione di legno lamellare è evidente nelle strutture di elevazione verticale.  
In <https://www.archdaily.com>.



## 4.1 Il legno

Prima della rivoluzione industriale l'eterogeneità e anisotropia intrinseche del legno sono state affrontate in modo efficace attraverso tecniche di lavorazione manuale. Metodi di fabbricazione artigianale lenti ma ingegnosi, hanno permesso di tagliare e lavorare con precisione i tronchi seguendo la naturale direzione delle venature.

La progettazione e la lavorazione artigianale erano in stretta relazione con il materiale disponibile nell'area geografica.

Con l'industrializzazione il predominio del legno in architettura è stato sempre più sfidato da nuovi materiali omogenei con proprietà definite con precisione favorendo approcci progettuali e ingegneristici dettati da principi normativi.<sup>1</sup>

L'uomo nel corso della sua storia si è confrontato con il legno fin dalla preistoria, questo materiale è stato una risorsa indispensabile per costruire edifici, fabbricare strumenti e riscaldarsi.<sup>2</sup>

Assieme a pietra, fango e mattoni crudi, il legno era il materiale da costruzione più impiegato; deve la sua diffusione alla facile reperibilità, alla versatilità d'uso, alla facilità di taglio e trasporto oltre che alle sue proprietà meccaniche.

<sup>1</sup> Axel Kilian, *Advancing wood architecture an introduction* in Achim Menges, Tobias Schwinn, Oliver David Krieg (a cura di), *Advancing wood architecture: a computational approach*, Londra: Routledge, 2017, pp. 1-3.

<sup>2</sup> Almerico Ribera, *Legno. L'universo costruttivo di un materiale nuovo*, Milano: Ribera Legnoformazione, 2015.

<sup>3</sup> Pietromaria Davoli, *Costruire con il legno. Requisiti, criteri progettuali, esecuzione, prestazioni*, Milano: Hoepli, 1996, p. 7.

In contesti geografici come Nord America e Nord Europa l'adozione del legno ha sempre avuto un uso costante nella storia, essendo radicato nella cultura edilizia, infatti negli Stati Uniti il 90% delle case di nuova costruzione hanno struttura lignea mentre in Canada l'80%.<sup>3</sup>

In Italia la predilezione per laterizio e cemento armato hanno portato ad un uso limitato del legno in ambito architettonico, relegandolo molto spesso a solo materiale di finitura o arredo per gran parte del Ventesimo secolo.

La ricostruzione post bellica e il boom edilizio degli anni 60 e 70 del Novecento hanno un legame indissolubile con il calcestruzzo armato che irrompe generando una nuova cultura del getto; le interessanti possibilità di industrializzazione e prefabbricazione di questo, unite alla sua economicità, hanno determinato la sua florida e rapida diffusione.

La convergenza verso nuovi materiali in architettura è stata favorita dall'assenza di strategie di promozione e di manualistica tecnica adeguata per il legno che spesso ha

scoraggiato generazioni di progettisti, i quali hanno preferito tecnologie e tecniche più diffuse e documentate. Recentemente si sta osservando un'inversione di tendenza, infatti, la volontà di utilizzare sempre più risorse rinnovabili, con lo scopo di diminuire l'inquinamento ambientale, ha portato alla riproposizione del legno come materiale da costruzione e di impiego strutturale nell'ultimo quarto del ventesimo secolo.

La crescente adozione del legno è stata ben delineata dai report statistici di Assolegno di **FederlegnoArredo**.

FederlegnoArredo, è un'associazione industriale che riunisce tutte le imprese operanti nel settore della lavorazione del legno in Italia e negli ultimi anni ha prodotto rapporti utili per fotografare dati sul mercato degli edifici in legno costruiti sul territorio nazionale delineando l'evoluzione dello sviluppo dell'edilizia sostenibile e mostrando la sempre più crescente adozione del legno.



Fig. 1

**Fig. 1** Foto del Metropol Parasol, realizzato in Kerto e progettato dall'architetto Jürgen Hermann Mayer. In <https://www.arup.com>.

Uno dei primi report del 2010 intitolato “Il mercato italiano delle case in legno nel 2010. Analisi del mercato Previsioni fino al 2015” redatto da Paolo Gardino per **Promo\_legno**, in collaborazione con Assolegno (Associazione Nazionale Industrie Prime Lavorazioni e Costruzioni in Legno) mostra la situazione di crisi per l'industria edile di quegli anni:

«Dal 2008 al 2011, il settore delle costruzioni ha perso il 17,8% in termini di investimenti, ovvero circa 29 miliardi di euro. Si tratta della crisi più grave dal dopoguerra [...]. Il numero di abitazioni ultimate scende da 338.000 nel 2007 a 229.000 nel 2010 e nel 2011 scenderà ulteriormente a 213.000 (-37%)».<sup>4</sup>

Il documento segnala l'aumento delle costruzioni in legno in controtendenza con la crisi del settore in corso, riportando con i seguenti dati una spinta crescente di uso di questo materiale:

«Il numero di abitazioni in legno è quintuplicato tra il 2006 ed il 2010 ed aumenterà [...]. Non azzardiamo previsioni circa il numero di edifici per i prossimi 5 anni, date le troppe variabili coinvolte.

Riteniamo però che le costruzioni in legno di medie dimensioni aumenteranno sensibilmente.

La percentuale di edifici in legno sul totale è molto ragguardevole: l'8,5%. Ogni 12 edifici costruiti in Italia nel 2010, uno è in legno».<sup>5</sup>

**Promo\_legno** è un'associazione fondata nel 1999 con lo scopo di promuovere l'utilizzo del legno in Italia, in ambito architettonico, ingegneristico e artistico.  
In <https://www.promolegno.com>.

4-5 Trentino Sviluppo, <http://trentinosviluppo.etour.tn.it>, (consultato Marzo 2021).

**Fig. 2** Grafico mostra l'incremento del numero di abitazioni realizzate in legno tra il 2006 e 2015. Ricerca Gardino e Cresme, Paolo Gardino Consulting per promo\_legno.

**Fig. 2**

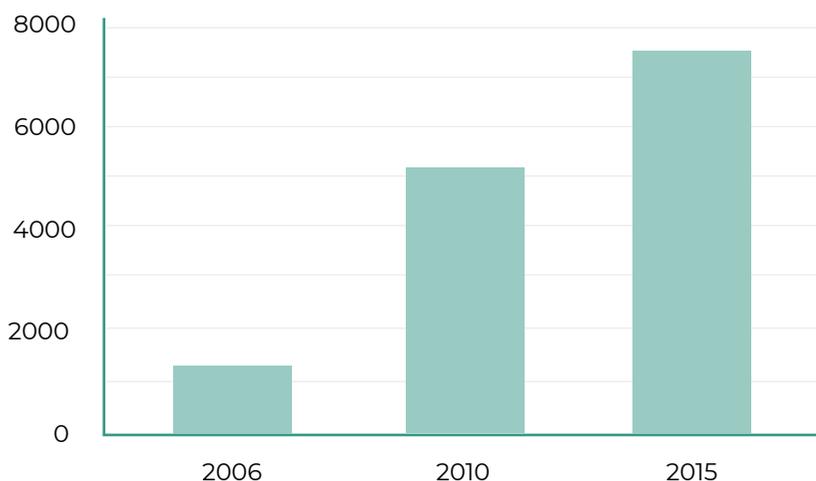
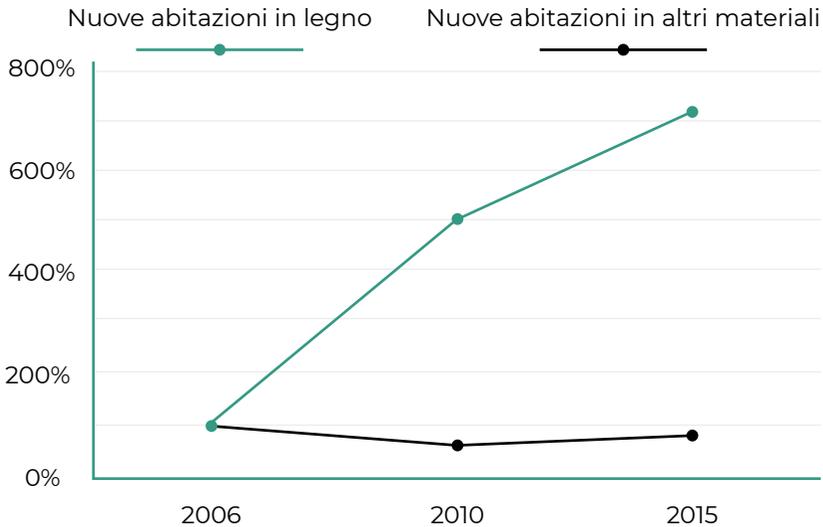


Fig. 3



A questo segnale positivo si aggiunge il rapido sviluppo di imprese specializzate nella costruzione di case in legno, infatti, 55 aziende sulle 192 intervistate lavora da meno di 5 anni. Nonostante il settore dell'edilizia non abbia recuperato le gravi perdite causate dalla crisi del settore immobiliare, i report redatti negli anni seguenti confermano il trend positivo con un aumento di fatturato e interventi in tutta Europa.

Dal quarto report "Case e edifici in legno" condotto dal Centro Studi Federlegnoarredo, infatti, risulta che l'Italia è il quarto paese europeo per numero di edifici prefabbricati prodotti in legno con più di 3.000 unità nel 2018.<sup>6-7</sup>

Il fatturato complessivo del mercato della bioedilizia in legno del 2018 ammonta a circa 724 milioni di euro segnando un aumento del 5% rispetto al precedente anno.<sup>8-9</sup> Anche il report intitolato "5° Rapporto Edilizia in Legno", diffuso nel 2020 evidenzia la tendenza verso la bioedilizia. Angelo Luigi Marchetti, presidente di Assolegno, commenta:

«In questi anni il settore delle costruzioni in legno è cresciuto [...] ma ha anche saputo instaurare un rapporto stretto con gli architetti, offrendo loro un supporto tecnico [...]. Una collaborazione che sta dando ottimi frutti e che siamo certi si dimostrerà vincente, se pensiamo anche a quanto l'Europa si stia dimostrando orientata verso un'edilizia sempre più sostenibile».<sup>10</sup>

**Fig. 3** Grafico del numero di abitazioni realizzate in legno e altri materiali nel periodo 2006-2015. Ricerca Giardino e Cresme, Paolo Giardino Consulting per promo\_legno.

<sup>6</sup> Infobuild.it, <https://www.infobuild.it>, (consultato Marzo 2021).

<sup>7</sup> Federlegnoarredo, <https://www.federlegnoarredo.it>, (consultato Marzo 2021).

<sup>8</sup> Edilpotale, <https://www.edilportale.com>, (consultato Marzo 2021).

<sup>9</sup> Tekneco, <http://old.tekneco.it>, (consultato Febbraio 2021).

<sup>10</sup> ExpoClima, <https://www.expoclima.net>, (consultato Febbraio 2021).

## 4.2 Proprietà

La scienza delle costruzioni definisce il legno materiale composito in quanto costituito da una miscela naturale di cellulosa, emicellulosa e lignina.<sup>11</sup>

La natura biologica di questo materiale è determinante e si ripercuote nelle sue proprietà, infatti, è un materiale poroso, anisotropo, igroscopico ed eterogeneo.

Occorre differenziare le opere in legno in base alle tecniche di produzione distinguendo tra legno massiccio e prodotti derivati dal legno.

Il primo può presentare dei difetti dovuti alla natura eterogenea del materiale, le opere in segato provengono direttamente dal taglio di un tronco quindi ogni elemento è differente dagli altri. Appartengono alla categoria di derivati del legno i prodotti che provengono da processi di lavorazione industriale come per esempio il lamellare, il compensato e il multistrato prodotto da incollaggio di lastre di legno.

Il legno è un materiale anisotropo, le sue proprietà variano a seconda della direzione delle sollecitazioni esterne rispetto alla direzione delle fibre e ha comportamento viscoelastico.

Le sue caratteristiche meccaniche variano a seconda della tipologia di legno, al tipo di taglio, alla temperatura, all'umidità e alla durata del carico.

Le travi lignee sottoposte a sollecitazioni di carico risultano più resistenti per sollecitazioni orientate lungo la direzione delle fibre, mentre la sua resistenza si riduce quando le sollecitazioni sono ortogonali.

La natura igroscopica del legno permette l'assorbimento o cessione di umidità nell'ambiente, infatti i prodotti in legno all'interno di una stanza migliorano la qualità dell'aria cedendo o assorbendo umidità, quindi le condizioni termoigrometriche ambientali influenzano l'equilibrio di umidità del materiale.

Questa proprietà del legno è stata adottata per due padiglioni sperimentali meteorosensibili: il padiglione **HygroSkin** degli architetti Achim Menges Architect, Oliver David Krieg, Steffen Reichert e l'installazione **Hygroscope** di Achim Menges in collaborazione con Steffen Reichert per l'Institute for Computational Design and Construction dell'Università di Stoccarda, entrambi

<sup>11</sup> Matteo Gastaldi, Luca Bertolini, *Introduzione ai materiali per l'architettura*, CittàStudi Edizioni, 2011, pp. 237-240.

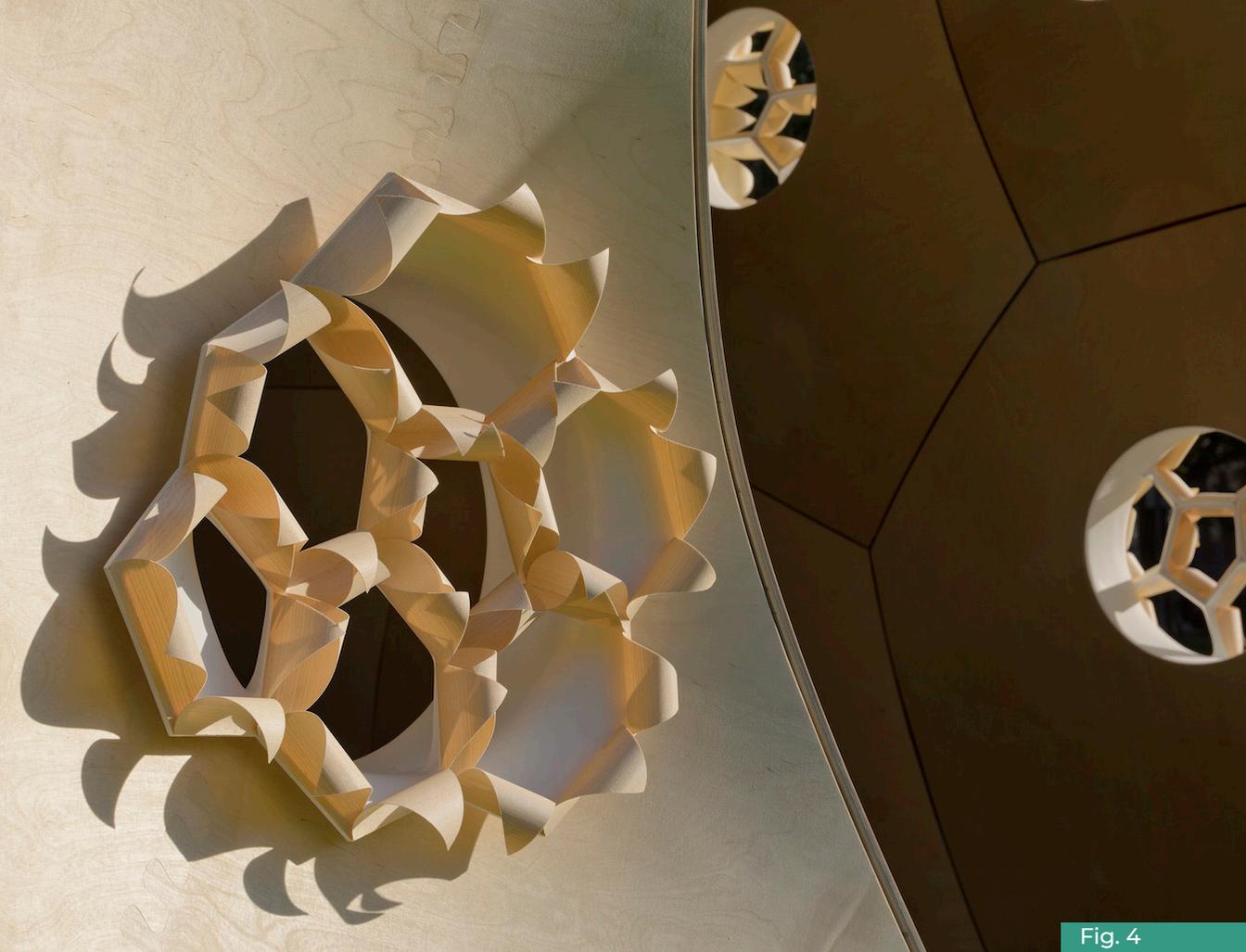


Fig. 4

realizzati con sottili lamelle igro-responsive in grado di curvare e piegarsi al variare delle condizioni climatiche.<sup>12-13</sup>

L'umidità è il parametro che influisce maggiormente sulla resistenza meccanica, quest'ultima è infatti inversamente proporzionale all'aumentare dell'umidità. Le caratteristiche di massima resistenza si verificano allo stato anidro, cioè in assenza di acqua. All'aumentare della temperatura corrisponde una diminuzione della resistenza, inoltre, la durata del carico influisce sulle prestazioni.

La facile reperibilità e il basso costo coniugate alle proprietà di isolamento termico, acustico e elettrico fanno del legno un materiale versatile adatto all'uso architettonico, non solo in ambito strutturale.

**Fig. 4** Fotografia del padiglione meteosensibile HygroSkin, che sfrutta l'igroscopicità del legno per generare un cinetismo che non fa ricorso ad alimentazione energetica. In <https://www.archdaily.com>.

<sup>12</sup> Architettura Ecosostenibile, <https://www.architetturaecosostenibile.it>, (consultato Aprile 2021).

<sup>13</sup> Archdaily, <https://www.archdaily.com>, (consultato Aprile 2021)..

## 4.3 Classificazione

### Resistenza meccanica

La norma UNI EN 338 definisce e codifica le classi di resistenza meccanica per il legno ad uso strutturale indicando con la sigla C il legno massiccio di conifera, D il legno massiccio di latifoglia e GL legno lamellare seguito dal valore di resistenza alla flessione.

La classificazione del legno strutturale può essere eseguita con metodo a vista o metodo a macchina con lo scopo di attribuire una classe di resistenza per poi confrontarla e armonizzarla con quelle definite dalla EN 338.

Nella norma UNI 11035 sono inserite le regole per la classificazione del legno per lo standard nazionale, le normative differiscono a seconda delle varie nazioni e in base alla specie legnose facendo riferimento alla UNI EN 14081.

La classificazione a vista deve essere eseguita da personale esperto e qualificato che segue criteri tra cui numero e distribuzione dei nodi presenti, larghezza degli anelli di accrescimento, danni provocati da insetti o funghi, fessurazioni e inclinazione o torsione delle fibre. È un processo più lungo ma meno costoso se confrontato con la classificazione a macchina che si basa sull'uso di strumenti con tecnologie laser o a raggi X che determinano la relativa classe di resistenza.<sup>14</sup>

### Durabilità

Il legno è un materiale organico e per questo soggetto a degrado e attacco biologici da parte di funghi ed insetti. Per durabilità si intende:

«Conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche di un materiale o una struttura, affinché i livelli di sicurezza siano mantenuti durante la vita dell'opera».<sup>15</sup>

<sup>14</sup> Filiera Foresta Legno Italia, <https://www.forestalegnoitalia.it>, (consultato Maggio 2021).

<sup>15</sup> Almerico Ribera, *Legno. L'universo costruttivo di un materiale nuovo*, Milano: Ribera Legnoformazione, 2015, p. 27.

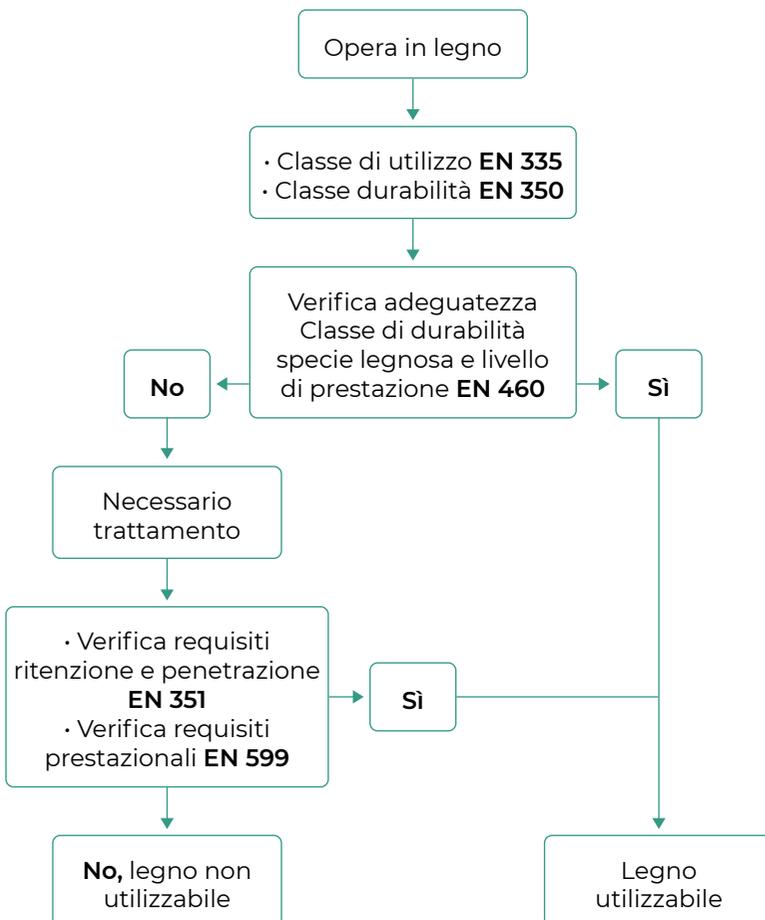
L'adozione di una tipologia di legno non adeguata influisce negativamente sulla durabilità dell'opera, per questo la scelta della specie legnosa più adatta da parte del progettista è fondamentale per un corretto utilizzo del materiale. Le normative vigenti sono un utile aiuto per una scelta corretta tra cui le più rilevanti in questo ambito sono le norme UNI EN 335, EN 350 e EN 460.

La norma UNI EN 335 introduce 5 classi di rischio biologico, il legno è un materiale il cui degrado e la durabilità dipendono da umidità che genera funghi o batteri e insetti che attaccano il materiale.

Le classi di utilizzo 1 e 2 sono destinate ad uso interno come per esempio mobili o parquet, alla classe 3 corrisponde un uso esterno non a contatto con il suolo come serramenti, o rivestimenti. Alla classe 4 corrispondono travi o arredi urbani che sono collocati all'esterno e a contatto con il suolo, infine il legno in classe 5, ha un ampio impiego in quanto può essere immerso in acqua di mare, come per esempio i pali per pontili o ormeggi.<sup>16</sup>

### Processo decisionale

Fig. 5



<sup>16</sup> Infobuild, <https://www.infobuild.it>, (consultato Maggio 2021).

Fig. 5 Schema del processo decisionale e normativo del legno tratto da <https://www.infobuild.it>.

## 4.4 Effetti fisiologici e psicologici

Molte ricerche scientifiche stanno evidenziando che il legno può contribuire alla salute e al benessere degli occupanti degli edifici.<sup>17</sup>

L'uso di questo materiale in un edificio ha evidenti vantaggi fisiologici e psicologici: la sensazione di calore naturale e comfort che il legno suscita nelle persone ha l'effetto di abbassare la pressione sanguigna, la frequenza cardiaca e ridurre lo stress.<sup>18</sup>

La stimolazione olfattiva, visiva e uditiva di elementi lignei ha l'effetto di migliorare il benessere degli esseri umani, infatti studi ed esperimenti scientifici che trattano questi temi sono molto utili per la progettazione architettonica che ha come fine il comfort dei suoi fruitori.

L'articolo "Effetti fisiologici del legno sull'uomo: una rassegna" pubblicato sul Journal of Wood Science raccoglie 41 articoli di ricerche e studi pubblicati tra il 1992 e 2016, soprattutto in Giappone, su questa tematica.<sup>19</sup>

Le ricerche condotte si basano sull'ipotesi che ambienti altamente urbanizzati e artificiali causano uno stress fisiologico, mentre l'esposizione ad ambienti naturali o semplicemente lo stimolo di materiali come il legno apporta benessere.

Trascuriamo gran parte del tempo in ambienti chiusi come case, auto e uffici riducendo la nostra esposizione agli ambienti naturali.

Non essendo sempre possibile trascorrere tempo all'aperto, la presenza di rivestimenti o arredi lignei permette di trasmettere benefici a coloro che abitano in città.<sup>20</sup>

Gli studi sulla stimolazione olfattiva si sono concentrati sugli effetti apportati dall'inalazione di olii di legno. Il ricercatore Yoshifumi Miyazaki ha condotto un esperimento in una camera con temperatura, umidità e illuminazione controllati.

Dodici uomini hanno soggiornato per tre notti in una stanza di un hotel urbano dove l'olio di cipresso giapponese (*Chamaecyparis obtusa*) è stato vaporizzato tramite l'utilizzo di un umidificatore.

L'esperimento ha rilevato una riduzione della concentrazione di ormoni di adrenalina e noradrenalina nei partecipanti, oltre a segnalare la produzione indotta delle cellule Natural Killer.

<sup>17</sup> Thinkwood, <https://www.thinkwood.com>, (consultato Maggio 2021).

<sup>18</sup> Planetark, <https://planetark.org>, (consultato Maggio 2021).

<sup>19</sup> Harumi Ikei, Chorong Song, Yoshifumi Miyazaki, *Physiological effects of wood on humans: a review* in «Journal of Wood Science», vol. 63, 2017, pp. 1-23.

<sup>20</sup> Chorong Song, Harumi Ikei, Yoshifumi Miyazaki, *Physiological effects of nature therapy: a review of the research in japan* in «International journal of environmental research and public health» vol. 13, 2016.

In conclusione, la stimolazione olfattiva di un prodotto legnoso ha portato al miglioramento delle funzioni immunitarie.<sup>21</sup>

Satoshi Sakuragawa e il suo team di ricerca hanno invece esaminato gli effetti sulla pressione sanguigna a seguito della stimolazione visiva mediante pannelli murali in cipresso giapponese o in acciaio.

I partecipanti all'esperimento hanno osservato individualmente ogni tipo di pannello per 90 secondi, e durante la stimolazione visiva, che ha coinvolto le lastre in cipresso, la pressione arteriosa sistolica è diminuita.<sup>22-23</sup>

Nel 2017 uno studio mirava a chiarire gli effetti fisiologici sull'attività cerebrale e sull'attività nervosa autonoma al tocco del legno con il palmo confrontandolo con altri materiali. Diciotto studenti hanno partecipato seduti con gli occhi chiusi toccando 4 tipi di materiali per 90 secondi. La concentrazione di ossiemoglobina e la variabilità della frequenza cardiaca sono state utilizzate come indicatori dell'attività nervosa autonoma.

<sup>21</sup> Ryoko Masago, Tamiko Matsuda, Yoshiaki Kikuchi, Yoshifumi Miyazaki, Koichi Iwanaga, Hajime Harada, Tetsuo Katsuura, *Effects of inhalation of essential oils on EEG activity and sensory evaluation in* «Journal of physiological anthropology and applied human science», vol. 19, 2000, pp. 35-42.

<sup>22</sup> Satoshi Sakuragawa, Yoshifumi Miyazaki, Tomoyuki Kaneko, Teruo Makita, *Influence of wood wall panels on physiological and psychological responses in* «Journal of Wood Science», vol. 51, 2005, pp. 136-140.

<sup>23</sup> Takeshi Morikawa, Yoshifumi Miyazaki, Shigeo Kobayashi, *Time-series variations of blood pressure due to contact with wood in* «Journal of wood science», vol. 44, 1998, pp. 495-497.

**Fig. 6** Fotografia dell'esperimento condotto da Harumi Ikei, Chorong Song e Yoshifumi Miyazaki contenuta in «International Journal of Environmental Research and Public Health», vol. 14.



**Fig. 6**

I pannelli utilizzati erano di quercia bianca non rivestita, di marmo, di ceramica e di acciaio inossidabile.

Lo studio ha rivelato che toccare il legno con il palmo calma l'attività della corteccia prefrontale e induce un'attività nervosa parasimpatica più di altri materiali, producendo in tal modo il rilassamento fisiologico.<sup>24</sup>

La temperatura del materiale ha una notevole influenza sull'aumento della pressione sanguigna: il contatto con materiali artificiali come metalli e acrilico ne provoca l'aumento, mentre questo non avviene con il legno.

Anche l'indagine condotta dall'Università della British Columbia nel 2010 ha testato gli effetti della riduzione dello stress provocati alla vista di rivestimento ligneo e di piante all'interno di una stanza.<sup>25</sup>

119 studenti universitari posizionati in quattro stanze arredate in maniera differente si sono prestati alla sperimentazione:

**Stanza 1** assenza di arredi con finiture di legno e piante.

**Stanza 2** presenza di arredi con finiture di legno ma assenza di piante.

**Stanza 3** assenza di arredi con finiture di legno ma presenza di piante.

**Stanza 4** presenza di arredi con finiture di legno e piante.

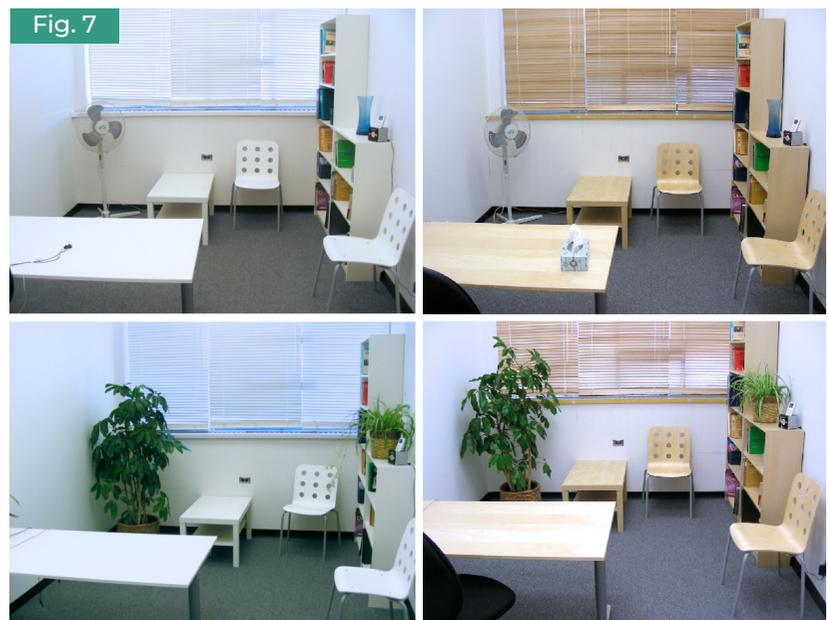
24 Harumi Ikei, Chorong Song, Yoshifumi Miyazaki, *Physiological Effects of Touching Wood in «International Journal of Environmental Research and Public Health»*, vol. 14, 2017, p. 801.

25 Thinkwood, <https://www.thinkwood.com>, (consultato Maggio 2021).

**Fig. 7** Fotografia delle 4 stanze utilizzate nell'esperimento condotto da David Robert Fell per l'University of British Columbia di Vancouver in *Wood in the human environment: restorative properties of wood In The Built Indoor Environment*.

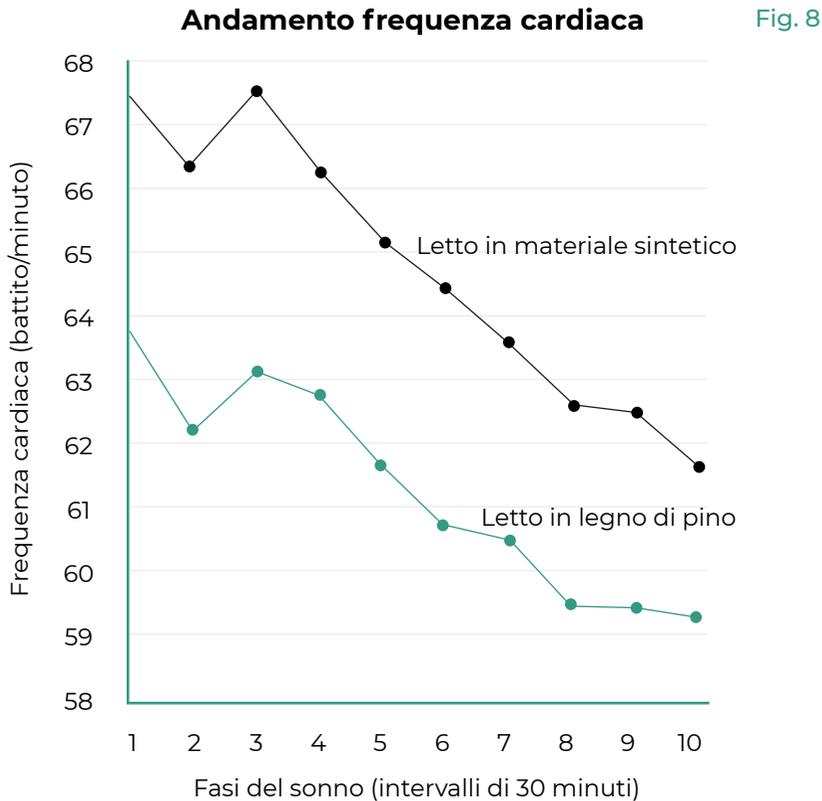
26 David Robert Fell, *Wood in the human environment: restorative properties of wood In The Built Indoor Environment*, The University Of British Columbia Vancouver, 2010.

27 WoodWorks, <https://www.woodworks.org>, (consultato Maggio 2021).



Anche in questo studio è stato riscontrato una riduzione dello stress per effetto del legno sul Sistema Nervoso Simpatico, responsabile delle risposte fisiologiche negli esseri umani.<sup>26-27</sup>

Uno studio austriaco ha esaminato la frequenza cardiaca di 30 persone che hanno dormito in un letto di pino cembro per 3 settimane e le ha confrontate con la frequenza cardiaca di soggetti che hanno dormito in un letto in materiale sintetico per lo stesso periodo di tempo. Dormire a contatto con il legno di pino ha ridotto la frequenza cardiaca di 3500 battiti al giorno.



**Fig. 8** Grafico che illustra i dati di un esperimento di monitoraggio della frequenza cardiaca nel corso della notte confrontando 2 tipologie differenti di letto. La presenza di legno ha evidenza la riduzione di frequenza cardiaca.

Un altro studio austriaco della durata di un anno ha esaminato 36 studenti delle scuole superiori divisi in due gruppi a cui è stato assegnato rispettivamente un'aula arredata con pavimenti e arredi in legno massello e un'aula dotata di pavimento in linoleum e pareti in cartongesso. I risultati hanno mostrato differenze significative tra i due gruppi: gli studenti tenuti nelle aule con legno segnalavano percezione dello stress ridotta e un incremento delle interazioni con gli insegnanti.<sup>28</sup> Pure i tempi di recupero in ospedale sono ridotti, in presenza di arredi in legno e di piante, lo dimostra uno studio canadese.

Sono da considerare i vantaggi di questo materiale per la progettazione di ambienti dove salute e sicurezza sono fondamentali, nelle strutture sanitarie per una migliore e più veloce riabilitazione dei pazienti, negli uffici per il benessere e produttività dei lavoratori.<sup>29</sup>

<sup>28</sup> Joanneum Research, <https://www.joanneum.at>, (consultato Maggio 2021).

<sup>29</sup> Paul Jiménez, Anita Dunkl, Kerstin Eibel, Elisabeth Denk, Vincent Grote, Christina Kelz, Maximilian Moser, *Wood or laminate? Psychological research of customer expectations in «Forests»*, vol. 7, 2016, p. 275.

## 4.5 Ambiente, foreste e certificazioni

<sup>30</sup> Pietromaria Davoli, *Costruire con il legno. Requisiti, criteri progettuali, esecuzione, prestazioni*, Milano: Hoepli, 1996.

<sup>31</sup> Achim Menges, Tobias Schwinn, Oliver David, *Advancing wood architecture an introduction in advancing wood architecture: a computational approach*, Londra: Routledge, 2017, pp. 1-3.

<sup>32</sup> Lauri Hetemäki, Marc Palahí, Robert Nasi, *Seeing the wood in the forests. Knowledge to Action 1*, European Forest Institute, Joensuu, Finlandia, 2020, pp. 20.

<sup>33</sup> Marco Marchetti, Marc Palahí, *Perspectives in bioeconomy: strategies, Green Deal and Covid-19* in «Journal of Silviculture and Forest Ecology», vol. 17, 2020, pp. 52-55.

<sup>34</sup> Wood. Building the future, <https://www.wooddays.eu>, (consultato Maggio 2021).

<sup>35</sup> Promolegno, <https://www.promolegno.com>, (consultato Maggio 2021).

<sup>36</sup> Architecture 2030, <https://architecture2030.org>, (consultato Maggio 2021).

Il legno si può definire come una risorsa naturale rinnovabile grazie alla sua capacità di riprodursi biologicamente.

Il suo impiego massiccio non impoverisce necessariamente il patrimonio boschivo solo se vengono applicate politiche e programmi di riforestazione per garantire la tutela ambientale.<sup>30</sup>

Circa il 30% di tutta la superficie mondiale è ricoperta da foreste, di queste circa il 57% si trova nei paesi in via di sviluppo, ciò rappresenta una grande sfida per quanto riguarda la selvicoltura sostenibile.<sup>31</sup>

Il legno ha un'impronta carbonica cinque volte inferiore rispetto alle fibre sintetiche come per esempio il poliestere ed è efficace per ridurre l'impronta carbonica nel settore delle costruzioni.

È cruciale assicurarsi che gli assortimenti legnosi prodotti nei sistemi forestali non siano in conflitto con la biodiversità delle foreste tramite politiche di salvaguardia e regolamentazione.<sup>32-33</sup>

Dal punto di vista ambientale sono numerosi i vantaggi nell'adozione del legno, infatti, oltre ad essere una risorsa rinnovabile, è in grado di immagazzinare al suo interno anidride carbonica.

Gli alberi durante il loro ciclo di vita assorbono grandi quantità di CO<sub>2</sub> rimuovendola dall'atmosfera che rimane stoccata nel legno sotto forma di carbonio come biomassa e liberano ossigeno in atmosfera durante il processo fotosintetico.

In un metro cubo di legno rimane imprigionata circa una tonnellata di CO<sub>2</sub>, l'anidride carbonica viene sottratta all'atmosfera fino a quando il legno si degrada o viene bruciato.<sup>34-35</sup>

Piantare alberi aiuta a ridurre l'impatto delle emissioni e preferire il legno come materiale da costruzione rispetto ad altri significa anche ridurre l'uso di materiali ad alta intensità di carbonio e non rinnovabili come il calcestruzzo e l'acciaio.<sup>36</sup>

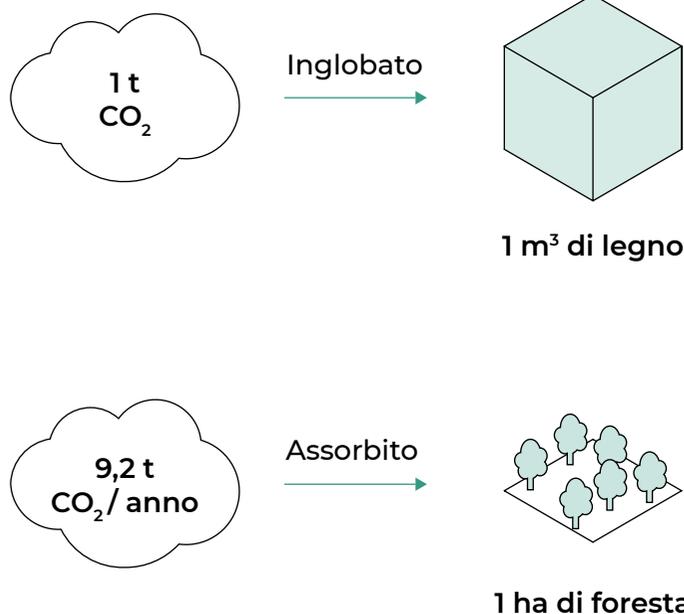
Il settore produttivo di materiale edile è responsabile dell'11% delle emissioni globali di diossido di carbonio, di queste circa il 9% delle emissioni globali annue sono attribuite alla produzione di calcestruzzo, ferro e acciaio. Comparando il consumo energetico totale per la produzione di una trave in acciaio con quello di una in legno, la prima risulta fino a 3 volte superiore mentre per

quanto riguarda l'uso di combustibili fossili è circa 6-12 volte maggiore.<sup>37</sup>

L'aumento dell'utilizzo del legno nell'industria edile comporterebbe una riduzione delle emissioni di carbonio. Inoltre, il vantaggio di progettare e adottare sistemi di legno prefabbricato favoriscono il montaggio e lo smontaggio a fine vita e consentono il riutilizzo del legname creando un ciclo di vita del prodotto più efficiente sotto il profilo delle risorse.<sup>38</sup>

Il protocollo di Kyoto nel 1997 riconosce la capacità fissativa delle foreste e le identifica come uno strumento moderatore delle emissioni.

**L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC)** stima che, nei casi più favorevoli, in un anno, un ettaro di foresta sia in grado di assorbire circa 9,2 tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente. Questo dato non è fisso ma varia a seconda del tipo di flora presente, della zona geografica, del tipo di foresta e dal numero di giorni di attività vegetativa annua ma restituisce comunque un incoraggiante spunto per la valorizzazione di questi luoghi.<sup>39-40</sup>



<sup>37</sup> Ann Kristin Petersen, Birger Solberg, *Greenhouse gas emissions, life-cycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction* in «Environmental Science & Policy», vol. 5, 2002, pp. 169-182.

<sup>38</sup> Luisa Cabeza, Camila Barreneche, Laia Miró, Josep Morera, Esther Bartolíc, Inés Fernández, *Low carbon and low embodied energy materials in buildings: a review* in «Renewable and Sustainable Energy Reviews», vol. 23, 2013, pp. 536-542.

**Fig. 9** <sup>39</sup> Adam Robertson, Frank Lam, Raymond Cole, *A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: laminated timber or reinforced concrete* in «Buildings», 2012, pp. 245-270.

<sup>40</sup> Inventario Nazionale delle Foreste, <https://www.sian.it/inventarioforestale>, (consultato Maggio 2021).

**Fig. 9** Disegno che sintetizza graficamente la quantità di CO<sub>2</sub> massima assorbita da 1 ettaro di foresta e immagazzinato da 1 metro cubo di legno.

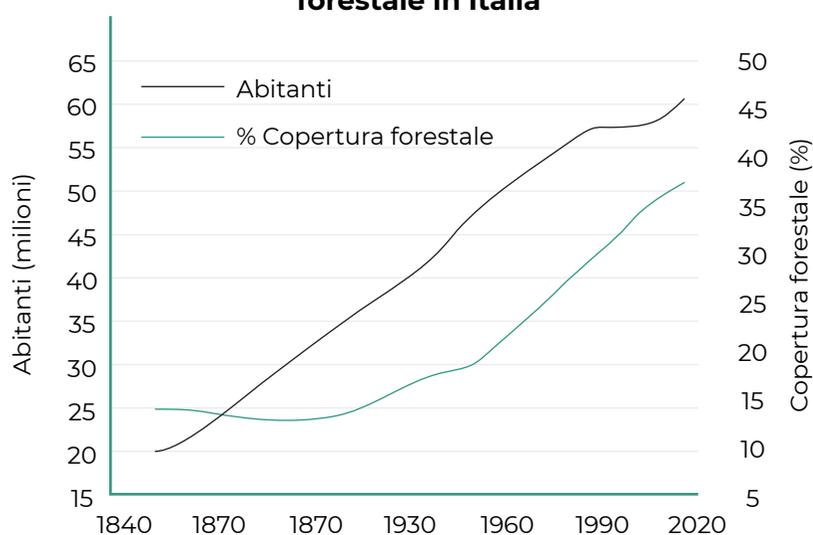
## Le foreste in Italia

L'Italia è il secondo paese in Europa per numero di importazioni di prodotti legnosi, secondo Ferderlegno-Arredo e Conlegno, infatti, oltre l'80% proviene dall'estero. Questa situazione è in contrasto con il fenomeno di espansione delle foreste sul territorio nazionale italiano.

I grafici riportati a lato, contenuti nell'articolo "Forests and forest-wood system in Italy: towards a new strategy to address local and global challenges" di Marco Marchetti,

Fig. 10

### Popolazione e copertura forestale in Italia



### Popolazione e copertura forestale nel Mondo

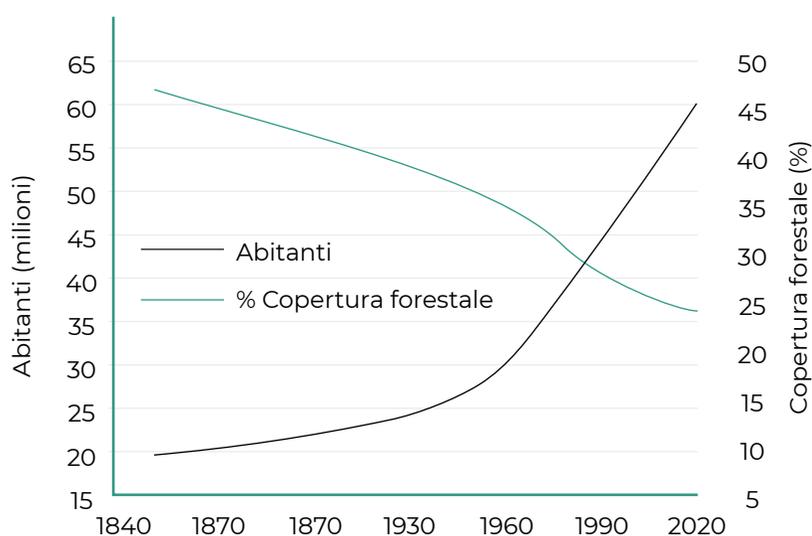


Fig. 10 Grafici raffiguranti l'andamento della crescita demografica e la percentuale di copertura forestale in Italia e nel Mondo. Contenuti in «Forest@. Journal of Silviculture and Forest Ecology», vol. 15.

Renzo Motta, Davide Pettenella, Lorenzo Sallustio e Giorgio Vacchiano mostrano l'andamento dell'aumento di popolazione confrontato con la copertura forestale nel mondo e in Italia (Fig. 9).

Come si può notare, l'aumento della popolazione a livello mondiale è inversamente proporzionale alla variazione di copertura forestale, mentre in Italia dall'inizio del XX secolo l'espansione del bosco è in aumento.

La dipendenza da legname e semilavorati esteri genera problemi ambientali, economici ed etici.<sup>41-42</sup>

Importare legname provoca l'aumento delle emissioni di CO<sub>2</sub> a causa del suo trasporto su lunghe distanze. Spesso il legno viene prelevato illegalmente in zone dove sono assenti normative e controlli ambientali impoverendo le popolazioni locali.

Per questo la certificazione della filiera del legno è indispensabile per uno sviluppo ambientale, economico e sociale sostenibile.

## Certificazioni

Le certificazioni sono uno strumento essenziale per garantire la provenienza legittima e legale del legno da piantagioni e foreste.

Il legname proveniente da fonti certificate offre evidenti benefici per la sostenibilità ambientale e sociale, oltre ad essere un contributo nella lotta contro il cambiamento climatico.

Creare una filiera del legno significa garantire la sua sostenibilità dal taglio alla sua trasformazione in prodotto finito.

Le certificazioni hanno lo scopo di assicurare che le piantagioni forestali siano gestite nel rispetto degli standard così da rendere la filiera del legno sostenibile, tutelando la biodiversità e il naturale ciclo di crescita della foresta.

Le aziende nel settore della lavorazione del legno che supportano questi sistemi comunicano il loro impegno contribuendo alla tracciabilità della materia prima durante tutte le fasi di trasformazione.<sup>43-44</sup>

Tra i principali sistemi di certificazione riportiamo il **FSC** acronimo di Forest Stewardship Council: è un'organizzazione non governativa internazionale nata nel 1993 che certifica attraverso un'etichettatura la

<sup>41</sup> Marco Marchetti, Renzo Motta, Davide Pettenella, Lorenzo Sallustio, Giorgio Vacchiano, *Forests and forest-wood system in Italy: towards a new strategy to address local and global challenges* in «Forest@. Journal of Silviculture and Forest Ecology», vol. 15, 2018, pp. 41-50.

<sup>42</sup> Commissione europea, <https://ec.europa.eu>, (consultato Maggio 2021).

<sup>43</sup> PEFC, <https://www.pefc.it>, (consultato Giugno 2021).

<sup>44</sup> Immobilgreen, <https://www.immobilgreen.it> (consultato Maggio 2021).

corretta gestione della foresta e la tracciabilità dei prodotti da essa derivati.

Il sistema di certificazione si basa su due principi: la gestione forestale che soddisfa gli standard e la “catena di custodia” ovvero attestare che il prodotto finale sia stato controllato in ogni fase della lavorazione.

Il sistema FSC identifica i prodotti realizzati con materiali provenienti da foreste gestite nel rispetto delle regolamentazioni ambientali, quindi non solo legno, ma anche carta e derivati.

L'organizzazione identifica 3 tipologie di etichette che si possono facilmente reperire anche su scatole e confezioni per il commercio.

**FSC 100%:** Tutti i materiali utilizzati nei prodotti con questa etichetta provengono da foreste certificate.

**FSC RICICLATO:** prodotti realizzati con il contenuto riciclato al 100%.

**FSC MIX:** prodotti realizzati con una miscela di materiali provenienti da foreste certificate FSC e materiali riciclati.<sup>45</sup>

Fig. 11



Il **PEFC** (Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes) è un'altra certificazione forestale tra le più diffuse che si basa sul rispetto dei criteri e degli indicatori definiti nelle “Conferenze per la protezione delle foreste in Europa” tenute ad Helsinki nel 1993 e Lisbona nel 1998.

<sup>45</sup> FSC, <https://www.pefc.it>, (consultato Aprile 2021).

Fig. 11 Etichetta FSC. In <https://fsc.org>.

Sustainable Managed Forest, nel quale si valutano i terreni e i metodi di gestione, sia durante la fase di trasformazione del prodotto attraverso la raccolta di documentazione cronologica per garantire l'origine e la tracciabilità della materia prima.<sup>46</sup>

L'organizzazione inoltre promuove campagne e progetti di valorizzazione e promozione boschiva collaborando con organizzazioni locali e globali.



Fig. 12

<sup>46</sup> CSQA, <https://www.csqa.it>, (consultato Maggio 2021).

**Fig. 12** Etichetta PEFC. In <https://www.e-cology.it>.

**Fig. 13** Fotografia della marchiatura PEFC. In <https://www.e-cology.it>.



Fig. 13

# 05

## Digital Fabrication: dal bit alla materia

di  
Riccardo Greco

Oggi è possibile tradurre un'idea direttamente in realtà generando un oggetto fisico da un modello virtuale.

Il percorso di ricerca ha analizzato e approfondito le tecniche innovative di produzione delineando così differenti alternative utili per la successiva applicazione progettuale. La Digital Fabrication è stata definita e descritta; l'indagine riporta le principali tecniche produttive oggi in uso per poi raccogliere gli esempi più rilevanti e specifici di padiglioni realizzati in legno nel panorama della ricerca accademica architettonica.

Digital Grottesque è una grotta artificiale progettata dagli architetti Michael Hansmeyer, Benjamin Dillenburger e interamente generata da algoritmi e stampata in 3D.



## 5.1 Fabbricazione digitale

<sup>1</sup> Francisco Javier Lena-Acebo, María Elena García-Ruiz, *The FABLAB Movement: Democratization of Digital Manufacturing*, in Alicia Guerra Guerra (a cura di), *Organizational Transformation and Managing Innovation in the Fourth Industrial Revolution*, Hershey: IGI Global, 2018.

<sup>2</sup> Matteo Vittone, *Plywood design: applicazioni e progetti dalla fine dell'Ottocento alla Digital Fabrication. Evoluzione tecnologica del compensato di legno quale componente costruttivo*, tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile, Politecnico di Torino, a.a. 2018 2019, rel. Prof. Guido Callegari.

<sup>3</sup> Antoine Picon, *Architecture and the virtual: towards a new materiality?* in «Praxis Journal of Philosophy», vol. 6, 2004, pp. 114-121.

<sup>4</sup> Randy Deutsch, *Data-driven design and construction: 25 strategies for capturing, analyzing and applying building data*, Hoboken: Wiley, 2015.

<sup>5</sup> The fab Foundation, <https://fabfoundation.org>, (consultato Aprile 2020).

La fabbricazione digitale o Digital Fabrication è definita come:

«Processo di fabbricazione nel quale computer e macchine a controllo numerico trasformano informazioni digitali in prodotti fisici reali».<sup>1</sup>

La fabbricazione digitale è un processo produttivo che si distingue per l'uso del computer, il quale controlla e gestisce macchinari automatizzati per diverse lavorazioni. Rispetto alle lavorazioni tradizionali, la Digital Fabrication ha un'elevata precisione, automazione e un limitato spreco di materiale.

Stampa 3D, taglio laser e fresatura a controllo numerico sono alcune tecniche che fanno parte di questa categoria.<sup>2</sup>

L'architetto francese Antoine Picon, nel libro "Architecture and the Virtual", evidenzia come queste tecniche riescono a conciliare la prefabbricazione con la personalizzazione e coinvolgono differenti ambiti come la meccatronica, l'ingegneria dei materiali e la modellazione 3D.<sup>3</sup>

La capacità di elaborare informazioni e, successivamente, utilizzare i dati come elementi per l'evoluzione del progetto ha segnato l'inizio dell'era post-digitale caratterizzata dall'uso di strumenti computazionali e algoritmici.<sup>4</sup>

La nascita dei **Fab Lab** ha facilitato la diffusione e l'accesso della Digital Fabrication ad un gran numero di utenti.

I Fab Lab sono laboratori che offrono servizi personalizzati ideati da Neil Gershenfeld presso il MIT al fine di democratizzare queste tecnologie.

Questa tendenza è correlata alla cultura del **Maker** e al movimento **Open-Source** basato su condivisione e comunità.

I Fab Lab sono luoghi di fabbricazione digitale ma anche di sperimentazione e ricerca tecnologica.

Oggi questa rete è una comunità aperta frequentata da artisti, ingegneri, educatori, studenti, dilettanti e professionisti in più di 1000 centri distribuiti in circa 78 paesi nel mondo.<sup>5</sup>

Questi processi produttivi alternativi sono in linea con lo scenario proposto per **l'industria 4.0** nella quale dati e materiali, progetto e fabbricazione si sovrappongono in un unicum. Si assiste al passaggio dal tradizionale processo industriale all'automazione con strumenti interconnessi e dialoganti.

Robotica, programmazione, realtà aumentata e intelligenza artificiale collaborano a costruire questo cambiamento e aprono nuove sfide per il futuro.

Il fenomeno della nuova industrializzazione digitale nell'edilizia è infatti basato sul dualismo materialità e immaterialità: il costruito e il dato.<sup>6</sup>

La comunicazione diretta con la macchina rende possibile la trasmissione di dati provenienti da modelli virtuali eliminando la necessità di comunicare al costruttore precise regole per la sua realizzazione o assemblaggio.

Inoltre, i dati sono interrogabili, aggiornabili e trasferibili in ogni momento durante il processo progettuale garantendo la continuità del flusso informativo.

Questa riflessione mette in evidenza che uno dei requisiti fondamentali della progettazione architettonica è garantire le informazioni del manufatto durante tutto il suo ciclo di vita.

Il dato e l'informazione quindi assumono un ruolo sempre più rilevanti e la sua comunicazione e condivisione è favorita dalle nuove tecnologie.<sup>7</sup>

<sup>6</sup> Sergio Russo Ermolli, *Tecnologia e costruzione di una nuova cultura materiale* in Massimo Perriccioli, Marina Rigillo, Sergio Russo Ermolli, Fabrizio Tucci (a cura di), *Il progetto nell'era digitale. Tecnologia, Natura, cultura*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2020.

<sup>7</sup> Giuliano Galluccio, *Digitalizzazione del settore delle costruzioni tra progettazione informativa e "artigianato" avanzato* in Marina Rigillo, Sergio Russo Ermolli, Fabrizio Tucci (a cura di), *Il progetto nell'era digitale. Tecnologia, Natura, cultura*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2020.



Fig. 1

**Fig. 1** Fotografia del Fab Lab di Torino, realizzata da Mauro Guglielminotti.

Nel Manifesto "Edificio 4.0 Costruire Digitale per un'Italia Sociale, più sicura, più sostenibile. Proposte per la rigenerazione urbana e una riqualificazione immobiliare del paese.", pubblicato da Federcostruzioni nel 2018, viene delineato il settore edile come uno dei comparti industriali meno digitalizzati, con conseguenze dirette sulla produttività, sui costi di realizzazione e gestione immobiliare-infrastrutturale.

Vengono riportate le stime realizzate da ISTAT e dal Boston Consulting Group secondo le quali il settore delle costruzioni, contaminato da nuove tecnologie, apre a percorsi di innovazione capaci di dare benefici dal punto di vista ambientale ed economico.

L'uso di applicazioni software e piattaforme digitali potrebbe portare a ridurre il costo totale dell'intero ciclo di vita di un'opera di quasi il 20%.

L'ISTAT stima un risparmio annuale compreso tra i 20,4 e i 32,2 miliardi di euro derivato dall'utilizzo della digitalizzazione nelle fasi di progettazione e di costruzione.<sup>8-9</sup>

<sup>8</sup> Manifesto Di Federcostruzioni, *Edificio 4.0 Costruire Digitale per un'Italia Sociale, più sicura, più sostenibile. Proposte per la rigenerazione urbana e una riqualificazione immobiliare del paese.* In <https://www.casaportale.com>.

<sup>9</sup> Alessandro Claudi de Saint Mihiel, Enza Tersigni, Alessio D'Ambrosio, *La modellazione informativa per la mitigazione degli impatti ambientali degli edifici NZEB* in Marina Rigillo, Sergio Russo Ermolli, Fabrizio Tucci (a cura di), *Il progetto nell'era digitale. Tecnologia, Natura, cultura*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2020, p. 192.

## 5.2 Tecniche di fabbricazione

Il fatto che geometrie complesse siano precisamente descrivibili e elaborabili da software di modellazione tridimensionale significa che la loro costruzione è raggiungibile per mezzo di processi di fabbricazione a controllo numerico computerizzato.

Nelle pagine seguenti sono state riportate le più diffuse tecniche di fabbricazione, raggruppabili in taglio bidimensionale, tecniche sottrattive, additive e formative.

### Taglio bidimensionale

Il taglio bidimensionale è la tecnica di fabbricazione più utilizzata. Taglio al plasma, raggio laser o getto d'acqua, implicano il movimento a due assi di pannelli o fogli di materiale. A muoversi è la testa di taglio, la base o entrambe. Le fabbricazioni bidimensionali trasformano fogli o pannelli planari con spessori variabili in componenti che successivamente piegati o assemblati creano elementi tridimensionali.

#### Taglio laser CNC

Questo tipo di macchine utilizzano un laser per effettuare tagli o incisioni, la sua potenza e velocità sono impostate in base alle dimensioni e alle proprietà fisiche del materiale. Questa tecnica non è adatta a tutti i materiali, infatti può tagliare solo quelli con spessore massimo compreso tra 5 e 8 pollici e quelli in grado di assorbire l'energia luminosa. I fogli di alluminio non sono adatti poiché riflettono il raggio laser.

#### Taglio al plasma CNC

In questa lavorazione vengono adottate macchine che utilizzano un flusso mirato di gas o plasma surriscaldato a temperatura molto elevata. Il taglio al plasma è ampiamente utilizzato per tagliare materiali metallici come acciaio e alluminio.

#### Taglio a getto d'acqua CNC

Come suggerisce il nome, un getto d'acqua ad alta pressione viene miscelato con particelle abrasive che causano la rapida erosione dell'elemento sul percorso di taglio non surriscaldando il materiale ed evitando quindi modifiche alla struttura molecolare. Questa tecnica può essere adottata per acciaio, legno o un'ampia gamma di composti fino a circa 15 pollici di spessore.<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Kolarevic Branko (a cura di), *Digital Fabrication: manufacturing architecture in the information age in reinventing the discourse. How digital tools help bridge and transform research, education and practice in architecture*, atti della 21a Conferenza Annuale dell'Association for Computer-Aided Design in Architecture, 11-14 Ottobre 2001, Buffalo, USA, pp. 268-278.

Con l'ausilio del software CATIA lo studio di Frank Gehry, uno dei primi architetti ad utilizzare tecniche di taglio CNC per edifici di grandi dimensioni, è stato in grado di definire le superfici a doppia curvatura e convertirle in superfici bidimensionali fabbricabili con lamiere piane come per la progettazione del Museo Guggenheim di Bilbao.<sup>11-12</sup>

<sup>11</sup> Annette LeCuyer, *Building Bilbao* in «Architectural Review», vol. 102, 1997, pp. 43-45.

<sup>12</sup> Charles Linn, *Creating sleek metal skins for buildings* in «Architectural Record», vol. 10, 2000, pp. 173-178.

**Fig. 2** Fotografia del Museo Guggenheim di Bilbao.  
In <http://corriereinnovazione.corriere.it>.

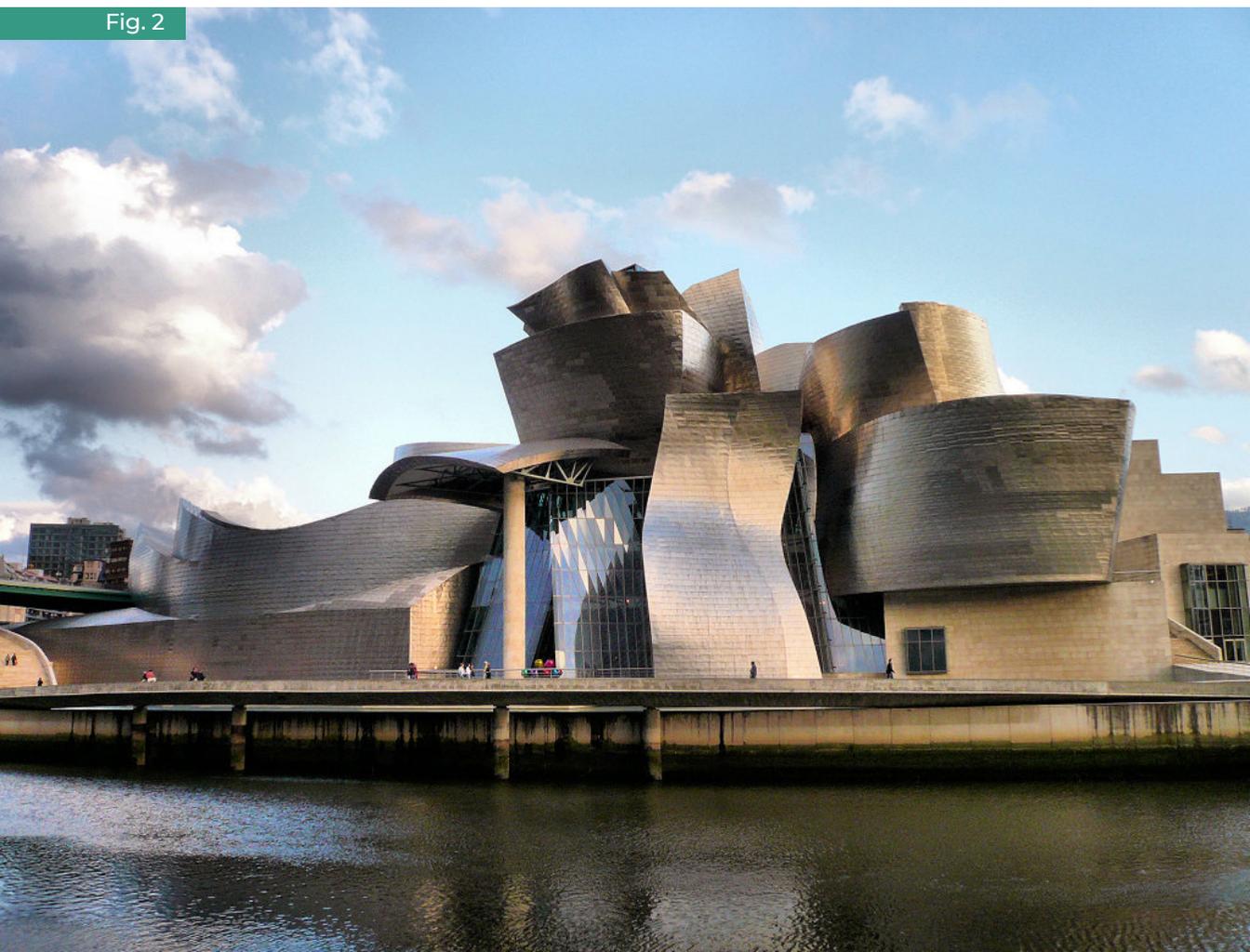
## Tecniche sottrattive

Le tecniche sottrattive comportano la rimozione di volume da materiale solido. Polistirolo, legno e altri possono essere fresati per intagliare la forma desiderata, le tecniche sottrattive includono:

### Fresatrici CNC

La fresatura è un processo di lavorazione con utensili che utilizzano una testa di taglio per rimuovere parti da un foglio o blocco di materiale. Le macchine differiscono per il numero di assi su cui operano, per esempio le frese 3D eseguono le operazioni su tutti e tre gli assi

Fig. 2



contemporaneamente ma esistono anche avanzate frese a 5 assi.

Recente applicazione della fresatura CNC è visibile nell'industria edile per produrre casseforme per la colata di elementi in calcestruzzo con geometria a doppia curvatura.

Tra gli esempi più rilevanti, gli stampi per la produzione delle vetrate e pannelli curvi della Condé Nast Cafeteria di Frank Gehry, il padiglione Bubble di Bernard Franken e la Nordpark Railway Stations di Zaha Hadid sono stati realizzati con tecnica sottrattiva.

## Tecniche additive

La produzione additiva crea oggetti tridimensionali dall'accumulo incrementale di strati di materiale, un processo inverso alla fresatura.

Il modello digitale tridimensionale è suddiviso in sezioni cioè in strati bidimensionali che vengono prodotti in modo incrementale.<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Paul Francis Jacobs, *Rapid prototyping and manufacturing: fundamentals of stereolithography*, Society of Manufacturing Engineers, 1992.

**Fig. 3** Fotografia della copertura della Nordpark Railway Stations a Innsbruck. In <https://www.zaha-hadid.com>.

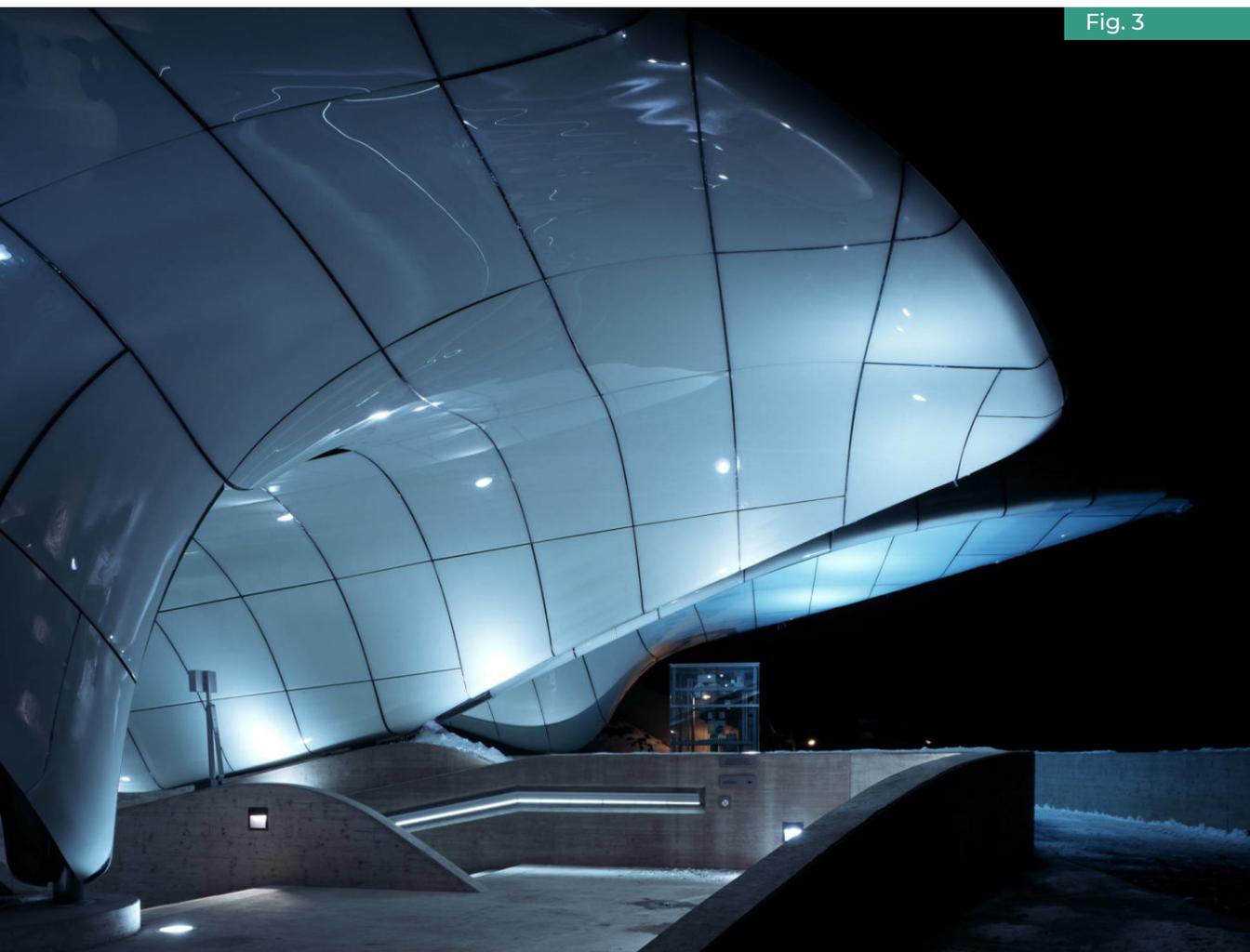


Fig. 3

I processi di fabbricazione additiva hanno una applicazione piuttosto ridotta nella progettazione degli edifici a causa delle dimensioni limitate degli oggetti producibili. Tuttavia, diverse tecniche sperimentali recenti propongono getti di calcestruzzo robotici. Le tecniche additive si basano sulla conversione del modello digitale in un formato leggibile dalla macchina, il formato di stampa 3D più comunemente utilizzato è Standard Tessellation Language (STL). Le tecniche di stampa 3D più comuni sono: stereolitografia (SLA), sinterizzazione laser selettiva (SLS) e modellazione di deposizione di fusibili (FDM).

La **stereolitografia** (SLA) si basa su resina liquida che si solidifica se esposta ai raggi UV. Il computer controlla una piattaforma mobile e il raggio luminoso. Questa tecnica sviluppata nel 1983 da **Charles Hull** può produrre oggetti ad altissima risoluzione.

La **sinterizzazione selettiva con laser** (SLS) comprende un fascio laser che fonde strati di polvere polimerica per creare oggetti tridimensionali. Sviluppata nel 1986 da **Carl Deckard** presso il Dipartimento dell'Università del Texas di ingegneria meccanica, la stampante SLS è in grado di fondere particelle di polvere di plastica, metalli, ceramica o vetro.

La SLS non necessita di strutture di supporto poiché le parti sinterizzate sono circondate e supportate dalla polvere non fusa.

La **modellazione a deposizione fusa** (FDM) è stata sviluppata nel 1988 da **Scott Crump**. Le stampanti FDM depositano filamenti di plastica ABS o PLA che si solidificano con il raffreddamento.

Sullo stesso principio si basa l'innovativa stampante MX3D Metal, sviluppata da Joris Laarman in collaborazione con la società di software Autodesk, che consiste in un braccio robotico che deposita metallo fuso, e il robot realizzato dall'University of Southern Denmark con dagli studi condotti da Roberto Naboni con getti di calcestruzzo manovrati da bracci robotizzati.<sup>14</sup>

## Fabbricazione formativa

Nella fabbricazione formativa forze meccaniche, calore o vapore vengono applicati su un materiale per ottenere una deformazione controllata come per esempio curvare tavole di legno con il vapore o il metallo con il calore.

<sup>14</sup> Arturo Tedeschi, *AAD Algorithms Aided Design*, Le Penseur, 2014.



Fig. 4



Fig. 5

**Fig. 4** Foto del 3D Printed Lightweight Beam, realizzato dal CREATE Group dell'University of Southern Denmark condotto dal Prof. Roberto Naboni. In <https://www.create-sdu.com>.

**Fig. 5** Foto Robotic concrete 3D printing realizzato dal CREATE Group dell'University of Southern Denmark condotto dal Prof. Roberto Naboni. In <https://www.create-sdu.com>.

## 5.3 Tecniche avanzate di assemblaggio

I sistemi di assemblaggio stanno subendo una modernizzazione grazie a recenti tecniche innovative e sperimentazioni.

Dopo la fabbricazione dei componenti, i modelli tridimensionali digitali possono essere utilizzati per determinare la posizione esatta di ogni elemento.

Per il Museo Guggenheim di Bilbao ad esempio, ogni componente è stato codificato a barre e contrassegnato con i nodi di intersezione per identificare la posizione esatta di montaggio. Questa pratica è comune nel settore aerospaziale ma di recente applicazione in edilizia.<sup>15</sup>

La collaborazione digitale tra architettura, ingegneria e la successiva costruzione si basa sulla comunicazione dell'informazione, la cui mancanza o erronea elaborazione compromette l'efficienza.

Così come tra il progettista e il produttore, anche tra il progettista e addetto al montaggio è basilare lo scambio informativo.

Oltre a bracci robotici si stanno anche adottando piccoli velivoli comunemente noti come droni (UAV) per la loro versatilità e libertà di movimento nello spazio.

Nel 2012, lo studio di architettura svizzero **Gramazio Kohler Architects** e il robotista Raffaello D'Andrea hanno collaborato con l'ETH di Zurigo per programmare una flotta di droni per sollevare e impilare circa 1500 mattoni di polistirolo presso il Centro FRAC di Orléans.<sup>16</sup>

Ammar Mirjan architetto presso lo studio studio svizzero commenta:

«È un peccato perdere tutte le informazioni spaziali che abbiamo nel modello 3D. Penso che i robot ci permettano di connettere i due insieme e questo può essere un vantaggio per l'intera catena del processo».<sup>17</sup>

Durante la Milano Design Week 2019 **MuDD Architects** hanno presentato Terramia un prototipo abitativo realizzato in fango e bambù in cui i droni sono stati impiegati per sollevare l'involucro in tessuto e per spruzzare una miscela isolante. L'assemblaggio si è svolto in un contesto urbano senza limitazioni al traffico pedonale mostrando le potenzialità di questa applicazione.<sup>18</sup>

<sup>15</sup> Annette LeCuyer, *Building Bilbao* in «Architectural Review», vol. 102, 1997, pp. 43-45.

<sup>16</sup> Archdaily, <https://www.archdaily.com>, (consultato Giugno 2021).

<sup>17</sup> Dezeen, <https://www.dezeen.com>, (consultato Giugno 2021).

<sup>18</sup> Parametric Architecture, <https://parametric-architecture.com>, (consultato Giugno 2021).



Fig. 6

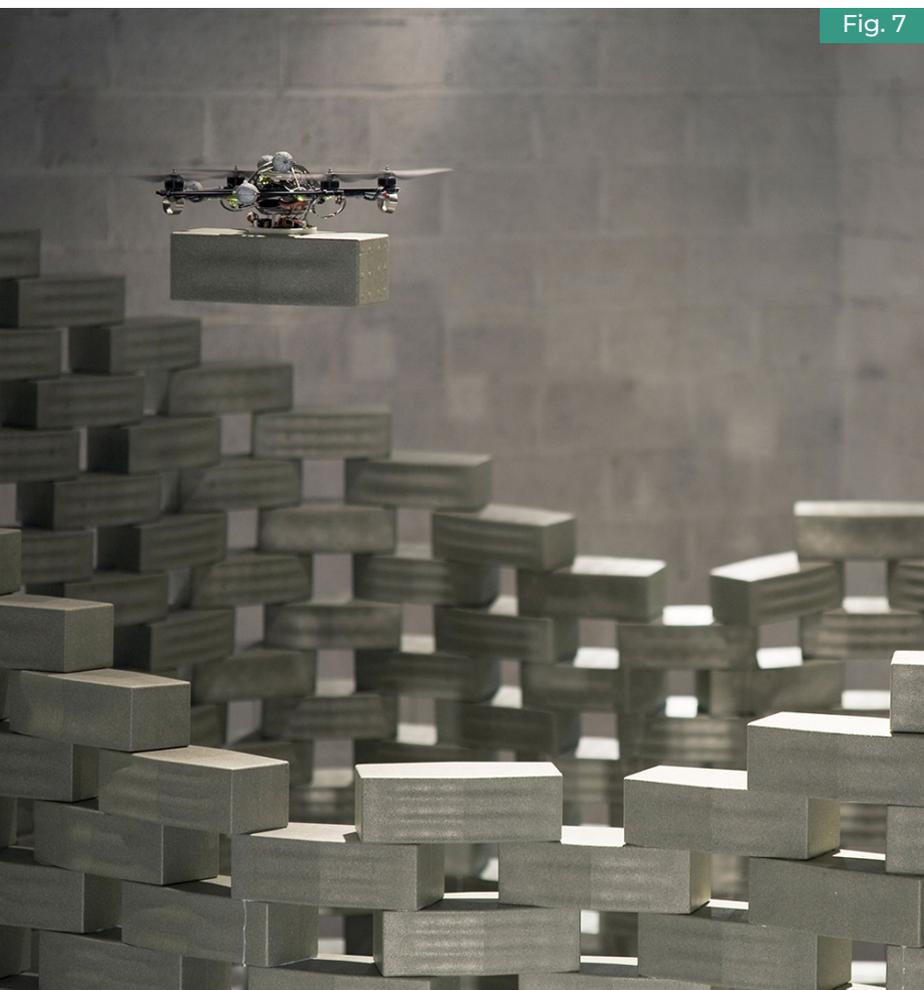


Fig. 7

**Fig. 6** Foto dell'assemblaggio del padiglione Terramia progettato da MuDD Architects. In <https://parametric-architecture.com>.

**Fig. 7** Foto della posa di un mattone da parte di drone programmato. In <https://www.dezeen.com>.

## 5.4 Fabbricazione digitale e ricerca accademica

Prima della nascita del computer già dagli anni quaranta del Novecento erano impiegate in ambito aerospaziale e militare macchine a controllo numerico, controllate da nastri perforati che contenevano le istruzioni.

**John Parsons** contribuì all'evoluzione di questa tecnologia, collaborando con il Massachusetts Institute of Technology dal 1949 al 1952 per creare una macchina sperimentale in grado di fresare a controllo numerico completamente automatizzata. È interessante notare, confrontando i moderni CNC computerizzati con le prime macchine analogiche, quanto i processi siano notevolmente simili.<sup>19</sup>

Nei primi anni del XXI secolo vengono avviate indagini e ricerche accademiche sulla produzione robotica in numerose università, tra le più famose ricordiamo l'ETH di Zurigo, la Technische Universität di Vienna, la Harvard Graduate School of Design, e l'Institute for Computational Design di Stoccarda.

Dal rapporto tra nuove tecniche di modellazione parametrica, materia ed evoluzione produttiva, nasce un processo creativo volto alla sperimentazione di codici formali innovativi.<sup>20</sup>

Il calcolo digitale e il pensiero computazionale sono gli aspetti fondamentali della sperimentazione. Le tecnologie di fabbricazione digitale, nello specifico la produzione robotica e la stampa 3D, costituiscono un ulteriore mezzo a disposizione del progettista attraverso i quali è possibile ampliare il ventaglio di possibilità stilistiche applicando differenti strategie di lavorazione e metodi di produzione.

La nascita del primo impianto di produzione robotica all'Istituto Federale Svizzero di Tecnologia di Zurigo (ETHZ) nel 2005, con la direzione di Fabio Gramazio e Matthias Kohler, ha segnato l'inizio di un percorso di fabbricazione digitale in architettura introducendo nuovi paradigmi progettuali in cui la macchina industriale diventa uno strumento che trasforma modelli virtuali in elementi materiali.

Le ricerche svolte presso l'ETH sono caratterizzate dalla stretta collaborazione con il mondo industriale che trasforma i progetti di ricerca in brevetti e successivamente in soluzioni tecnologiche applicate nei processi costruttivi.

<sup>19</sup> Thomasnet, <https://www.thomasnet.com>, (consultato Maggio 2021).

<sup>20</sup> Matthias Kohler, Fabio Gramazio, Willmann Jan, *The robotic touch: how robots change architecture*, Zurigo: Park Book, 2014.

La scala di sperimentazione della maggior parte delle analisi svolte è 1:1, operare in scala reale ha permesso di identificare i problemi di fattibilità.

La qualità della loro ricerca ha portato alla nascita del **National Center of Competence in Research** che coinvolge diverse discipline con un approccio interdisciplinare tra architettura, ingegneria, scienza dei materiali, informatica e robotica.

Tra le loro ricerche, il progetto brevettato **TailorCrete** in collaborazione con 14 partner accademici e industriali e finanziato da fondi europei, consiste in un sistema di casseformi per la produzione di geometrie eterogenee in calcestruzzo.<sup>21</sup>

## Il legno nella Digital Fabrication

Il lavoro di studio e ricerca della nostra tesi si occupa principalmente di indagare le architetture e i padiglioni realizzati in legno.

L'approfondimento analizza soprattutto i padiglioni realizzati dalle università e istituti di ricerca, per similarità dimensionale e costruttiva al padiglione progettato per lo Spazio Thetis. Gli esempi riportati sono una raccolta di metodi innovativi applicati a diverse tipologie di legno.



Fig. 8

<sup>21</sup> Angelo Figliola, Alessandra Battisti, *Post-industrial robotics: exploring informed architecture*, Springer International Publishing, 2020.

**Fig. 8** Foto della tecnologia di casseforme Tailorcrete. In <https://www.rok-office.com>.

## Wood Chip Barn

Il caso proposto è un esempio di procedura computazionale informata da dati ottenuti in tempo reale unita a nuove tecniche di produzione.

L'aspetto più interessante di questa architettura sperimentale è l'adozione del legno non ingegnerizzato per la sua costruzione.

La prima fase fu la scansione 3D di 250 tronchi d'albero della foresta di Hooke Park che digitalizzati restituiscono informazioni come volumetria, assi centrali e biforcazioni dei tronchi ad un modello digitale.

Successivamente venne creato un catalogo digitale di soluzioni per l'organizzazione spaziale dei tronchi, per ottenere un sistema in grado di aumentare la rigidità strutturale e minimizzare le sollecitazioni di taglio. Uno script sviluppato con Grasshopper è stato utilizzato per generare la disposizione finale degli elementi, il processo di ottimizzazione si è avvalso di algoritmi genetici attraverso la definizione di goal.

La struttura è stata assemblata in sito e ancorata al terreno da fondazioni in calcestruzzo.

La procedura di fabbricazione robotica prevedeva l'utilizzo di un robot Kuka KR 150 composto da un braccio robotico a 6 assi che ha permesso di realizzare giunzioni maschio-femmina personalizzate.

Fig. 9

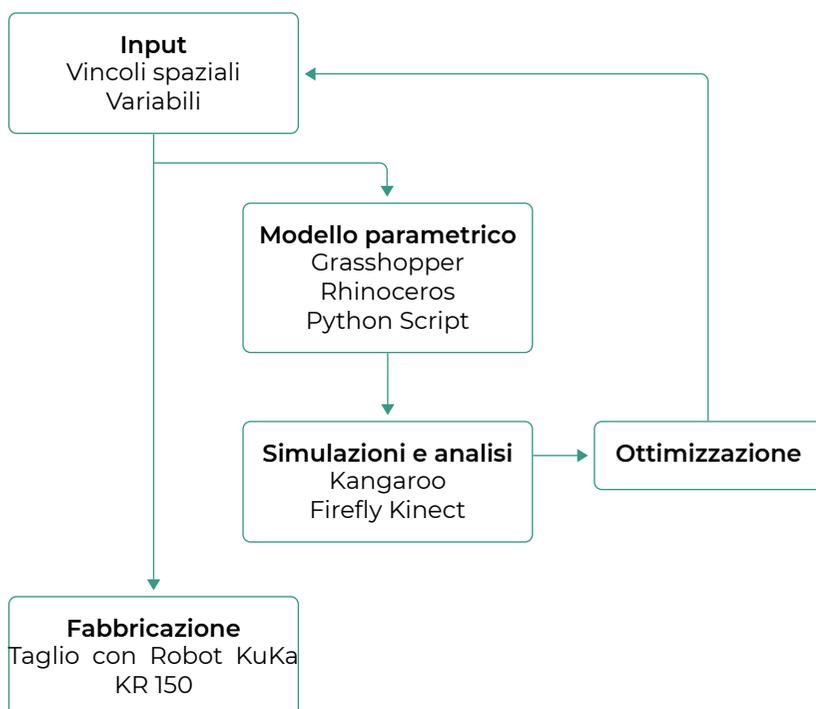


Fig. 9 Digramma del percorso progettuale di Wood Chip Barn, tratto da *Post-industrial robotics: exploring informed architecture* di Angelo Figliola e Alessandra Battisti.



Fig. 10

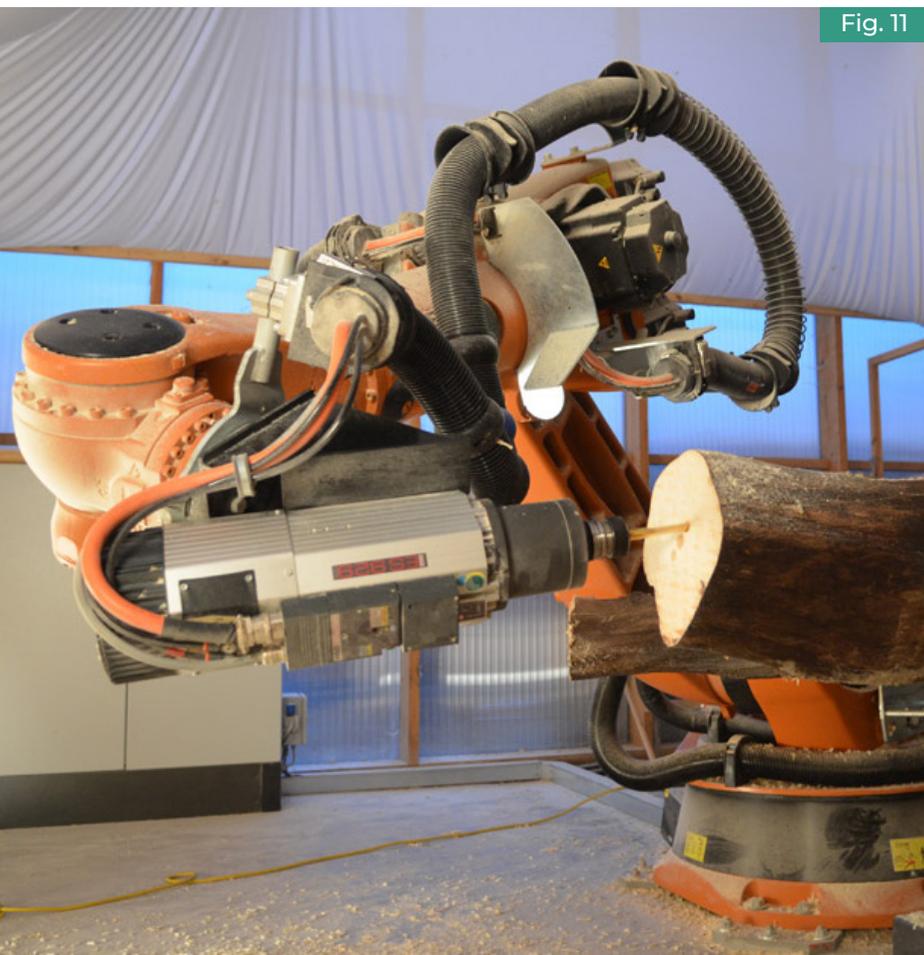


Fig. 11

Fig. 10 Foto dell'assemblaggio del padiglione Terramia progettato da MuDD Architects. In <https://architizer.com>.

Fig. 11 Foto della posa di un mattone da parte di drone programmato. In <https://www.dezeen.com>.

## ICD + ITKE Research Pavilion 2011

La ricerca condotta dall' ITKE Università di Stoccarda ha riguardato lo studio dello scheletro dell'echinoide, comunemente noto come riccio di mare, scomponendo i suoi principi geometrici e morfologici tra cui modularità e struttura.

Ogni porzione esagonale è orientata in relazione alle sollecitazioni meccaniche determinate dalla distribuzione dei pesi sulla superficie. La costruzione è stata ottenuta attraverso un procedimento di fabbricazione robotica di tipo sottrattivo, attraverso la fresatura è stato possibile creare giunzioni personalizzate.

La metodologia proposta ha permesso la realizzazione di un corpo architettonico di notevoli dimensioni utilizzando pannelli in compensato di spessore 6,5 mm, realizzando 850 componenti geometricamente differenti.

Fig. 12

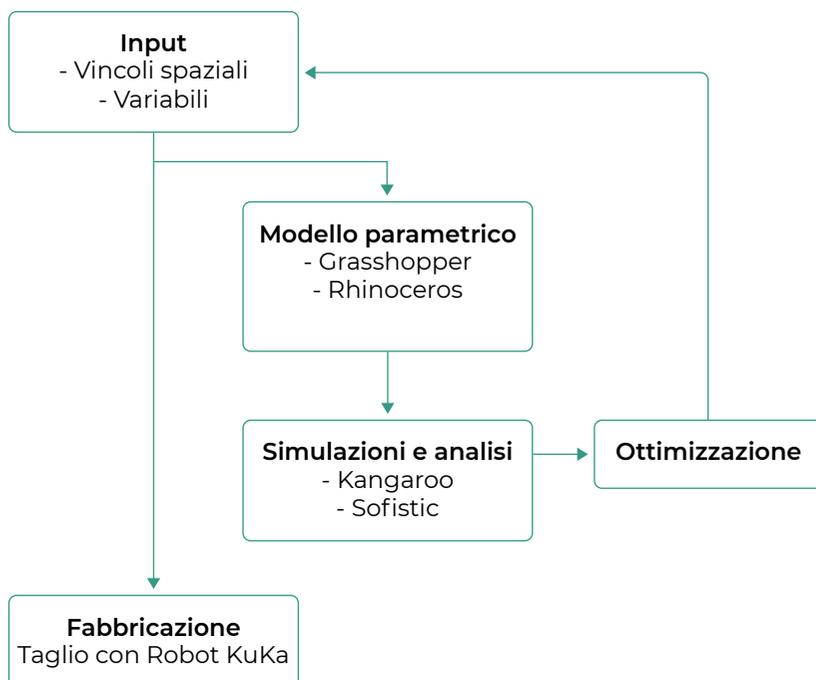


Fig. 12 Digramma del percorso progettuale del ICD + ITKE Research Pavilion 2011, tratto da *Post-industrial robotics: exploring informed architecture* di Angelo Figliola e Alessandra Battisti.



Fig. 13



Fig. 14

Fig. 13 Foto ITKE  
Research 2011 Pavilion.  
In [https://www.  
archdaily.com](https://www.archdaily.com).

Fig. 14 Foto del taglio  
robotico dei pannelli.  
In [https://www.  
archdaily.com](https://www.archdaily.com).

## Topology optimization and robotic fabrication of advanced timber space-frame structures

La ricerca svolta dall'ETH di Zurigo condotta da Gramazio Kohler nel 2015 intitolata "Topology Optimization and Robotic Fabrication of Advanced Timber Space-Frame Structures" indaga il processo di ottimizzazione di una struttura composta da elementi in legno lineari.

L'applicazione di questa metodologia si basa sull'utilizzo di algoritmi genetici e permette di ottimizzare l'utilizzo del materiale oltre a determinare la migliore configurazione in relazione al carico. La procedura di ottimizzazione computazionale ha permesso di ottimizzare la sezione resistente di ogni singolo elemento in legno, eliminando le connessioni in eccesso. Queste operazioni hanno portato ad un'elevata complessità e alla diversificazione delle giunzioni tra i vari elementi ma, grazie all'utilizzo di un robot industriale e di una sega circolare, è stato possibile realizzare unioni personalizzate, inoltre la strategia costruttiva adottata ha permesso di eliminare la presenza di strutture di supporto durante le operazioni di montaggio. Il prototipo, composto da 34 travi in legno, ha un ingombro di 5 x 5 x 5 metri, le verifiche effettuate a seguito della realizzazione del prototipo hanno permesso di testare l'effettiva accuratezza della simulazione digitale.

Fig. 15

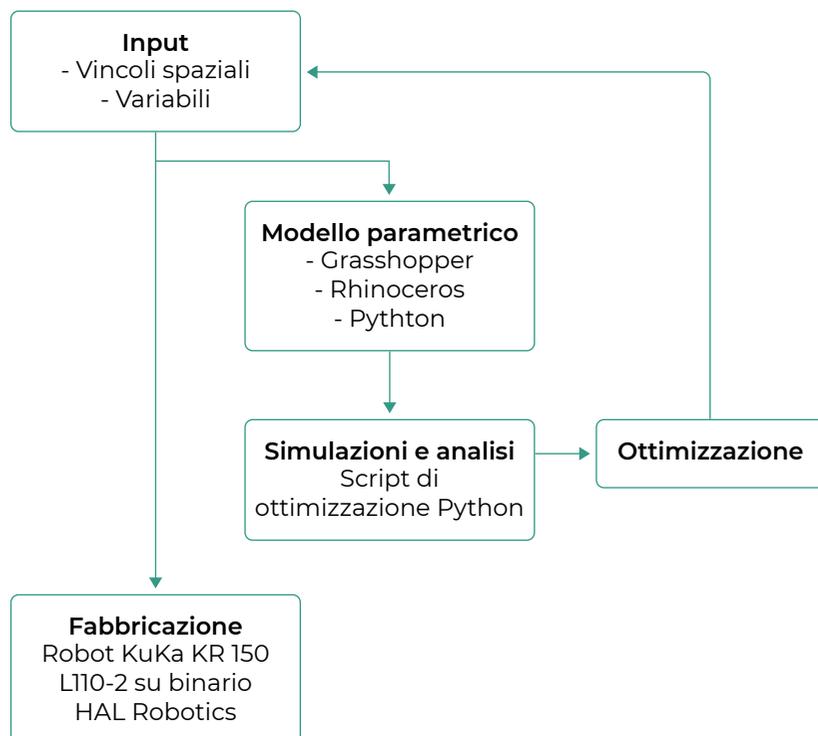


Fig. 15 Digramma del percorso progettuale del Topology optimization and robotic fabrication of advanced timber space-frame structures tratto da *Post-industrial robotics: exploring informed architecture* di Angelo Figliola e Alessandra Battisti.



Fig. 16

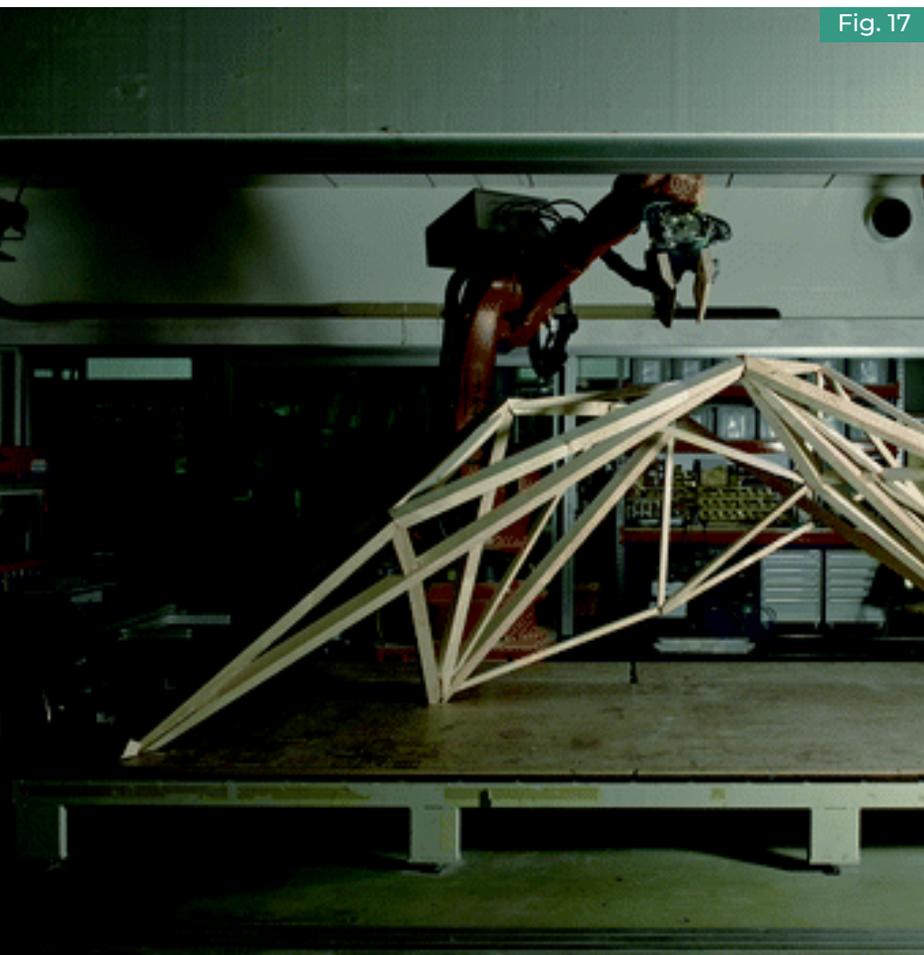


Fig. 17

**Fig. 16** Foto Prototipo realizzato per l'indagine Topology optimization and robotic fabrication of advanced timber space-frame structures in *Post-industrial robotics: exploring informed architecture* di Angelo Figliola e Alessandra Battisti.

**Fig. 17** Foto Prototipo in fase di montaggio. In *Post-industrial robotics: exploring informed architecture* di Angelo Figliola e Alessandra Battisti.

## Robotic Softness

La ricerca svolta presso Institute for Computational Design di Stoccarda ha interessato lo studio del fenomeno naturale della nidificazione per analizzare e comprendere la logica di formazione di sistemi complessi intrecciati realizzati da volatili.

La formazione dell'intreccio che costituisce il nido è guidata da performance ambientali e strutturali, il processo digitale e di fabbricazione ha portato alla creazione di un prototipo informato da variabili quali permeabilità alla luce e spessore dei filamenti tramite sensore cinetico in grado di restituire in tempo reale i dati provenienti dall'ambiente fisico.

Questa metodologia reinterpreta l'antica tecnica di intreccio, proponendo una geometria con un alto grado di reattività nei confronti degli input esterni, determinato dal progettista in fase di definizione del meta-progetto con l'ottimizzazione del modello in relazione alle prestazioni desiderate.

Fig. 18

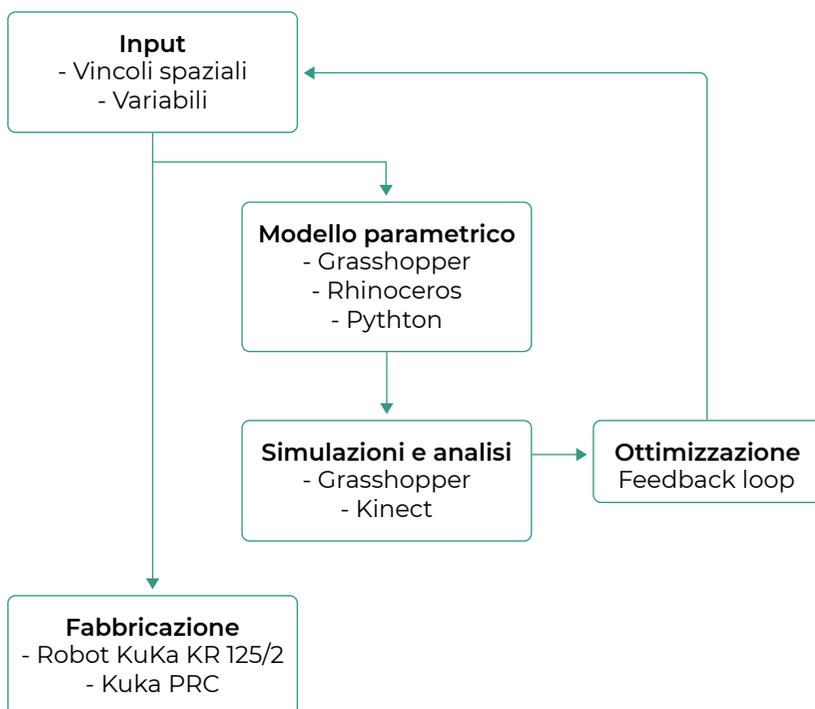


Fig. 18 Digramma del percorso progettuale del Robotic Softness tratto da *Post-industrial robotics: exploring informed architecture* di Angelo Figliola e Alessandra Battisti.



Fig. 19

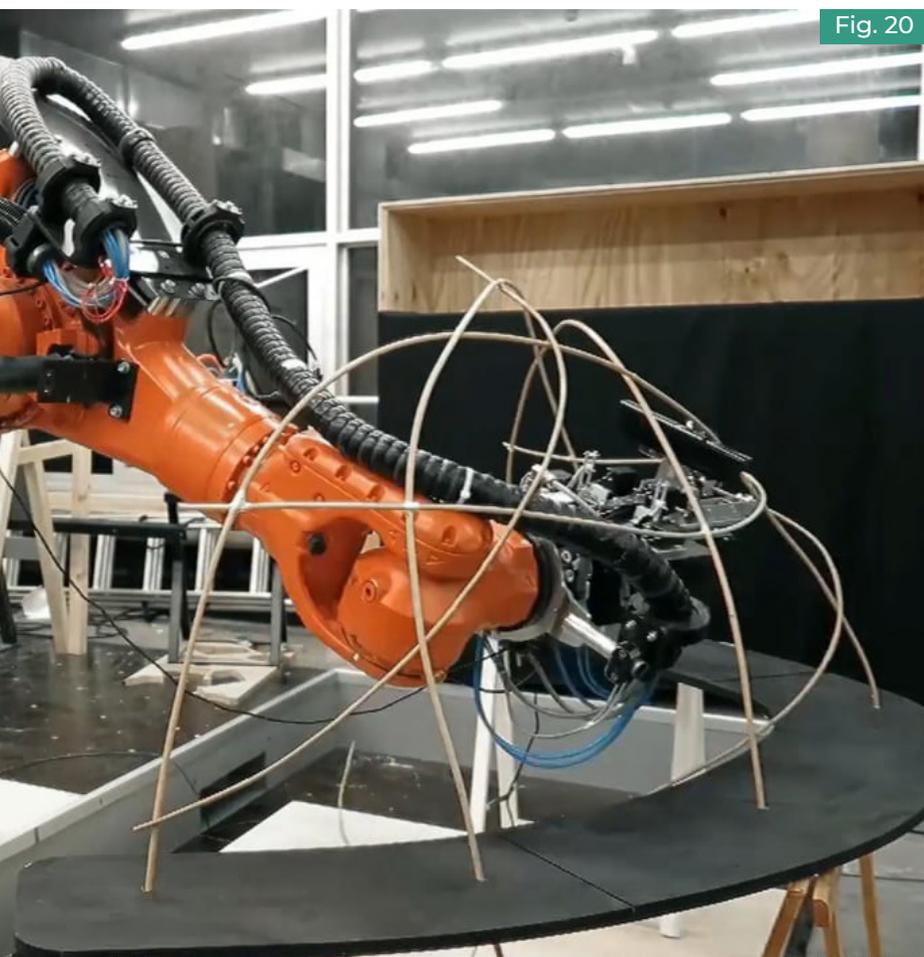


Fig. 20

**Fig. 19** Foto del prototipo di *Robotic Softness* in *Post-industrial robotics: exploring informed architecture* di Angelo Figliola e Alessandra Battisti.

**Fig. 20** Foto del prototipo in fase di montaggio. In *Post-industrial robotics: exploring informed architecture* di Angelo Figliola e Alessandra Battisti.

La rivoluzione digitale ha eliminato il limite di gestione di forme complesse rendendo la complessità ordinaria.

Le pratiche tradizionali improvvisamente appaiono statiche, integrare l'output di progettazione direttamente con gli strumenti per la fabbricazione supera la tradizionale produzione di elaborati grafici.

I disegni, strumento di rappresentazione per aiutare la comprensione e l'assemblaggio dei componenti, possono quindi essere omessi dalla stampa, le istruzioni di montaggio possono essere direttamente associate ai componenti o fornendo istruzioni codificate a robot o droni.

Il progetto mediato digitalmente, sfida quindi non solo il modo in cui si progettano gli edifici, ma anche il modo in cui si producono e si costruiscono.<sup>22-23</sup>

«L'integrazione della progettazione assistita da computer con la fabbricazione e la costruzione [...] ridefinisce fundamentalmente la relazione tra progettazione e produzione. Elimina molti vincoli geometrici imposti dai tradizionali processi di disegno e produzione, rendendo le forme curve complesse molto più facili da gestire, e riducendo la dipendenza da componenti standard prodotti in serie. Colma il divario tra la progettazione e la produzione [...]».<sup>24</sup>

<sup>22</sup> Joseph Pine, *Mass Customization: The new frontier in business competition*, Boston: Harvard Business, 1993.

<sup>23</sup> Sergio Russo Ermolli, *Tecnologia e costruzione di una nuova cultura materiale*, in Marina Rigillo, Sergio Russo Ermolli, Fabrizio Tucci (a cura di), *Il progetto nell'era digitale. Tecnologia, Natura, cultura*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2020.

<sup>24</sup> William John Mitchell, Malcolm McCullough, *Digital design media. Strumenti digitali per il design, l'architettura e la grafica*, McGraw-Hill Education, 1996.



# 06

## Forest Therapy e Outdoor Education

di  
Riccardo Grecu

La Forest Therapy e l'Outdoor Education sono pratiche che riguardano il rapporto fra l'uomo e l'ambiente naturale con lo scopo di trarre molteplici benefici: nel primo caso ottenere benessere psicofisico, nel secondo educare attraverso il contatto e la relazione con la natura.

In questo capitolo vengono raccolte e illustrate ricerche scientifiche a riguardo della Forest Therapy, pratica che ha larga diffusione in oriente e che recentemente si sta affacciando anche in Italia grazie al CAI e al CNR. Tra gli obiettivi del loro lavoro di ricerca vi è l'identificazione di rifugi e sentieri denominati "Stazioni di Terapia Forestale" che dal 2021 si aggiungeranno all'offerta turistica.

Si riporta inoltre la genesi e il dibattito pedagogico sull'Outdoor Education.

Entrambi i temi sono il fulcro attorno a cui ruota la proposta progettuale.

Bosco in località Perca, Trentino-Alto Adige,  
fotografia di Giulia Ramunno.



## 6.1 Forest Therapy

Alcuni recenti eventi ci hanno fatto comprendere l'importanza della foresta e della natura come elementi fondamentali per il benessere e la sopravvivenza umana. L'attenzione internazionale sullo sfruttamento del terreno e sulla deforestazione, causate dall'espansione insediativa umana, ha messo in risalto l'indispensabile ruolo delle foreste globali nell'ambito dell'assorbimento di anidride carbonica presente oltre ad influenzare la stabilità climatica e regolare l'umidità nell'atmosfera.

<sup>1</sup> Jean-Francois Bastin, Yelena Finegold, Claude Garcia, Danilo Mollicone, Marcelo Rezende, Devin Routh, Constantin Zohner, Thomas Crowther, *The global tree restoration potential* in «Science», vol. 365, 2019, pp. 76-79.

<sup>2</sup> Francesco Meneguzzo, Andrea Piotti, Camilla Avanzi, Federica Zabini, *Le foreste: risorse fondamentali per la vita umana* in Francesco Meneguzzo e Federica Zabini (a cura di), *Terapia Forestale. Una collaborazione tra il Club Alpino Italiano il Consiglio Nazionale delle Ricerche*, Roma: Cnr Edizioni, 2020, pp. 13-21.

<sup>3</sup> FAO, UNEP, *The State of the World's Forests 2020*, Roma, 2020.

**Fig. 1** Fotografia realizzata da Francesco Meneguzzo della sessione di Terapia Forestale condotta da Sara Nardini presso il Rifugio C. Battisti, Sezione CAI di Reggio Emilia, settembre 2020. In *Terapia forestale di Francesco Meneguzzo e Federica Zabini*.

La vita dell'uomo è indissolubilmente legata alle piante: dall'ossigeno che esse producono per la nostra respirazione e sopravvivenza, al loro contributo nella catena alimentare, fino al loro utilizzo come materia prima per manufatti.

La volontà di combattere il cambiamento climatico globale ha portato alla proposta e realizzazione di politiche di riforestazione in zone precedentemente deforestate.<sup>1-2</sup>

Inoltre la recente pandemia di Covid-19 ha favorito riflessioni sottolineando l'importanza della relazione uomo-natura per il benessere delle persone durante i mesi di lockdown.

L'esposizione all'ambiente forestale produce benefici psicologici, neurologici, cardiocircolatori e immunitari, tanto che alcune nazioni hanno riconosciuto la **Forest Therapy** come pratica preventiva per alcune patologie e il suo valore è stato recentemente accreditato dall'ONU (FAO e UNEP).<sup>3</sup>

Fig. 1



Lo **Shinrin-Yoku** o Forest Bathing, in italiano “bagno nella foresta”, è una pratica nata in Giappone come parte di un programma sanitario nazionale con lo scopo di affrontare i disturbi legati allo stress e, al contempo, avviare una politica di promozione e protezione del patrimonio forestale.

Numerosi studi dimostrano gli effetti benefici del trascorrere del tempo nella foresta, da allora l'approccio Shinrin Yoku è stato definito valido nell'ambito della prevenzione in Giappone fino ad essere riconosciuto dal sistema sanitario nazionale.

Si è diffuso successivamente in altri paesi orientali come Taiwan, Corea del Sud e Cina.<sup>4-5</sup>

Uno studio condotto dall'European Centre for Environment and Human Health dell'University of Exeter Medical School, riportato sulla rivista “Scientific Reports”, dimostra che trascorrere almeno 120 minuti, anche non consecutivi, a settimana in contatto con la natura migliora salute e benessere, indipendentemente dall'età e dalle caratteristiche dei soggetti.

Passare tempo nelle foreste, boschi o nei parchi aiuta le difese immunitarie, riduce lo stress, diminuisce la pressione sanguigna, migliora lo stato d'animo e induce rilassamento.<sup>6</sup>

Lo studio svolto da Yuko Tsunetsugu e dai suoi collaboratori ha dimostrato che trascorrere tempo nella foresta provocava, nei partecipanti, l'abbassamento della pressione sanguigna, la riduzione dell'attività nervosa simpatica e della frequenza cardiaca; le persone osservate erano quindi più rilassate.<sup>7</sup>

Il ricercatore e professore universitario giapponese Yoshifumi Miyazaki fornisce questa motivazione alla condizione di benessere:

«Nonostante viviamo in una società prevalentemente urbanizzata, il beneficio del bagno nella foresta è attribuibile al fatto di aver trascorso gran parte della nostra storia evolutiva in ambienti naturali, infatti le nostre funzioni fisiologiche sono ancora in relazione con la natura».<sup>8</sup>

4 Yoshifumi Miyazaki, Juyoung Lee, Bum-Jin Park, Yuko Tsunetsugu, Keiko Matsunaga, *Preventive medical effects of nature therapy* in «Japanese journal of hygiene», vol. 66, 2011.

5 Chorong Song, Harumi Ikei, Yoshifumi Miyazaki, *Physiological effects of nature therapy: a review of the research in japan* in «International journal of environmental research and public health» vol. 13, 2016.

6 Mathew White, Ian Alcock, James Grellier, Benedict Wheeler, Terry Hartig, Sara Warber, Angie Bone, Michael Depledge, Lora Fleming, *Spending at least 120 minutes a week in nature is associated with good health and wellbeing* in «Scientific Reports», vol. 9, 2019.

7 Yuko Tsunetsugu, Bum-Jin Park, Yoshifumi Miyazaki. *Trends in research related to "Shinrin-yoku" (taking in the forest atmosphere or forest bathing) in Japan*, in «Environmental health and preventive medicine», vol. 15, 2010, p 27-37.

8 Yoshifumi Miyazaki, Juyoung Lee, Bum-Jin Park, Yuko Tsunetsugu, Keiko Matsunaga, *Preventive medical effects of nature therapy* in «Japanese journal of hygiene», vol. 66, 2011.

## CAI e CNR: sessioni sperimentali di Forest Therapy

Il **Club Alpino Italiano** (CAI) per iniziativa del Comitato Scientifico Toscano in collaborazione con l'istituto per la BioEconomia del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IBE) e il Centro Regionale di Riferimento in Fitoterapia presso l'ospedale Careggi a Firenze, ha raccolto decine di pubblicazioni scientifiche realizzate in trent'anni di ricerca da varie università in merito al ruolo terapeutico della natura e ha raccolto questi dati in un volume pubblicato nel 2020 da CNR Edizioni.

L'intento è quello di documentare l'uso di queste pratiche largamente utilizzate in oriente illustrando esperienze e sessioni sperimentali condotte nel 2020 in Italia.

Tra gli obiettivi del lavoro di ricerca vi è anche l'identificazione di rifugi e sentieri denominati "Stazioni di Terapia Forestale" che dal 2021 si aggiungeranno all'offerta turistica.<sup>9</sup>

Gli effetti benefici sul piano psicologico sono connessi al rafforzamento del sistema immunitario, in particolare dovuto all'incremento quantitativo del livello di attivazione delle cellule natural killer (NK). Sono stati raccolti e analizzati i risultati delle 7 sessioni sperimentali condotte da CAI e CNR, queste differiscono per località, numero di partecipanti, altitudine del sito, specie arboree presenti, condizione climatica e concentrazione media di Composti Organici Volatili (COV).<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Club Alpino Italiano, <https://www.cai.it>, (consultato Maggio 2021).

<sup>10</sup> Federica Zabini, Francesco Meneguzzo, Lorenzo Albanese, Michela Nocetti, Michele Brunetti, Luisa Neri, Rita Baraldi, *Foreste, prevenzione e cura: evidenze scientifiche in* Francesco Meneguzzo e Federica Zabini (a cura di), *Terapia forestale. Una collaborazione tra il Club Alpino Italiano e il Consiglio Nazionale delle Ricerche*, Roma: Cnr Edizioni, 2020.

**Fig. 2** Dati delle sessioni sperimentali di terapia forestale. In *Terapia forestale di* Francesco Meneguzzo e Federica Zabini.

**Fig. 2**

### Sessione 1: 22 agosto 2020

Bosco collinare in localita Botinaccio, Firenze

35 partecipanti

Quota: 100-200 m s.l.m.

Specie prevalenti: cipresso, pino, leccio, lentisco

Cielo sereno, temperatura media 30°C

Concentrazione media COV = 68 parti per miliardo

### Sessione 2: 6 settembre 2020

Monte Duro, Reggio Emilia

35 partecipanti

Quota: 500-600 m s.l.m.

Specie prevalenti: pino silvestre, acero campestre,

carpino bianco e nero, sambuco, corniolo

Cielo sereno, temperatura media 23°C

Concentrazione media COV = 27 parti per miliardo

**Sessione 3:** 11 settembre 2020

Parco del Respiro, Trento

39 partecipanti

Quota: 900-1000 m s.l.m.

Specie prevalenti: pino silvestre, acero campestre, carpino bianco e nero, sambuco, corniolo

Cielo sereno, temperatura media 22°C

Concentrazione media COV = 38 parti per miliardo

**Sessione 4:** 12 settembre 2020

Parco del Respiro, Trento

22 partecipanti

Quota: 900-1000 m s.l.m.

Specie prevalenti: abete rosso, faggio

Cielo sereno, temperatura media 17°C

Concentrazione media COV = 28 parti per miliardo

**Sessione 5:** 27 settembre 2020

Rifugio CAI Cesare Battisti, Reggio Emilia

9 partecipanti

Quota: 1770 m s.l.m.

Specie prevalenti: faggio, abete bianco, pino mugho

Cielo nuvoloso, temperatura media 4°C

Concentrazione media COV = 10 parti per miliardo

**Sessione 6:** 17 ottobre 2020

Bosco collinare in localita Botinaccio, Firenze

21 partecipanti

Quota: 100-200 m s.l.m.

Specie prevalenti: cipresso, pino, leccio, lentisco

Cielo poco nuvoloso, temperatura media 15°C

Concentrazione media COV = 50 parti per miliardo

**Sessione 7:** 18 ottobre 2020

Foresta Modello delle Montagne Fiorentine,  
Firenze

33 partecipanti

Quota: 1250-1350 m s.l.m.

Specie prevalenti: faggio

Cielo poco nuvoloso, temperatura media 7°C

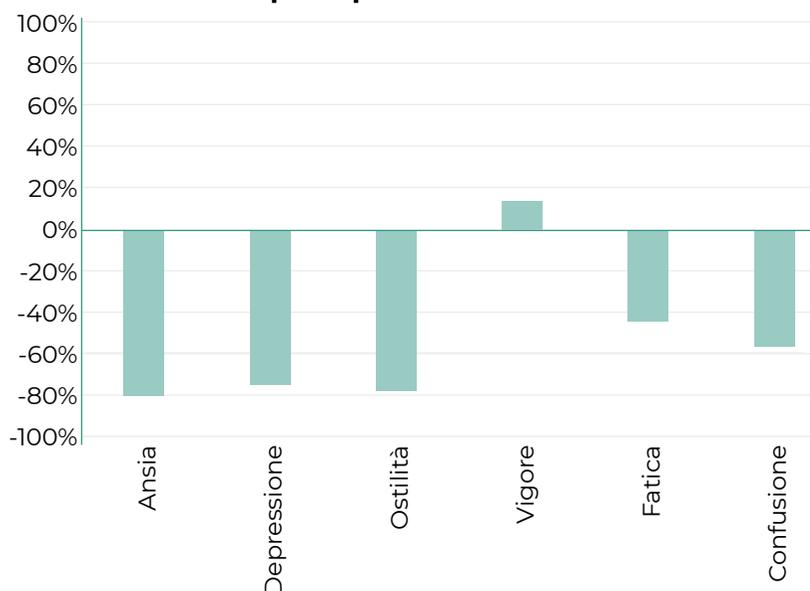
Concentrazione media COV = 15 parti per miliardo

L'organizzazione di ogni sessione prevedeva la compilazione di un questionario POMS (Profile of Mood States) da parte dei membri partecipanti per raccogliere e catalogare le loro sensazioni.

Le sessioni hanno evidenziato un effetto benefico con una notevole variazione percentuale degli indici prima e dopo le passeggiate nella foresta.

Ansia, depressione, ostilità, vigore, fatica e confusione sono stati i parametri selezionati per determinare le variazioni indotte dal percorso forestale.

**Fig. 3** Variazione percentuale pre e post sessione



**Fig. 3** Variazione percentuale pre-post degli indici degli stati d'animo, mediati su tutte le sessioni di terapia forestale condotte professionalmente da CAI e CNR tra settembre e ottobre 2020. In *Terapia forestale di Francesco Meneguzzo e Federica Zabini*.

## CAI e CNR: sessioni sperimentali di Forest Therapy

Occorre definire e chiarire le differenti terminologiche accostate al tema della Forest Therapy che non sono sinonimi di un'unica attività ma identificano pratiche differenti.

L'immersione forestale è l'esplorazione libera dell'ambiente boschivo e consiste nell'esplorazione dell'ambiente forestale attraverso brevi passeggiate o gite.

Il secondo termine da prendere in considerazione è il bagno forestale che consiste in attività di promozione della salute, talvolta presidiate da una guida, come camminate e svolgere semplici attività rilassanti, limitate a una singola sessione.

La terapia forestale, è una pratica strutturata in sessioni ripetute condotte da professionisti e operatori sanitari in cui sono previste attività come meditazione ed esercizi di respirazione.

## Forest Therapy, benefici sensoriali

Sono numerosi gli studi scientifici condotti sul tema che si sono focalizzati prevalentemente sulla relazione tra sensi e benefici; gli studi si possono catalogare in base ai tre sensi in cui si hanno, secondo studi scientifici, maggiori riscontri benefici.

### Vista

È comprovato che la stimolazione visiva apporta benefici psicologici e fisiologici. Recentemente in uno studio intitolato “Comparative Study of the Restorative Effects of Forest and Urban Videos during COVID-19 Lockdown: Intrinsic and Benchmark Values” si rilevano gli effetti di benessere psicologico a seguito di stimoli audiovisivi a tema naturale durante il recente lockdown per il Covid 19. Si è dimostrato che la visione su schermi o monitor di soggetti o paesaggi naturalistici apporta benessere nei partecipanti, riducendo il livello di ansia causato dall'impossibilità di fruire dell'ambiente esterno.<sup>11</sup>

Un'altra ricerca ha correlato il rilassamento psicofisico alla visione della geometria frattale, tipica delle strutture arboree ramificate. Un gruppo di ricerca olandese dimostra che la geometria, quindi la morfologia stessa di un albero, provoca rilassamento.

I 200 partecipanti all'esperimento identificano come più densiva la configurazione con un livello intermedio di densità di fronde arboree, mentre quella più densa risulta più stressante.<sup>12</sup>

### Variazione percentuale pre e post sessione **Fig. 4**



<sup>11</sup> Federica Zabini, Lorenzo Albanese, Francesco Riccardo Becheri, Gioele Gavazzi, Fiorenza Giganti, Fabio Giovanelli, Giorgio Gronchi, Andrea Guazzini, Marco Laurino, Qing Li, Tessa Marzi, Francesca Mastorci, Francesco Meneguzzo, Stefania Righi, Maria Pia Viggiano, *Comparative study of the restorative effects of forest and urban videos during COVID-19 Lockdown: Intrinsic and benchmark values* in «International journal of environmental research and public health», vol. 17, 2020.

<sup>12</sup> Marc van Almkerk, Cijs Huisman, *Virtual nature environments based on fractal geometry for optimizing restorative effects*, atti della 32a Conferenza Internazionale BCS Human Computer Interaction (HCI), 4-6 luglio 2018.

**Fig. 4** Le fronde degli alberi differiscono per densità e struttura, quest'ultima è riconducibile alla geometria frattale. In <http://creativecommons.org>.

## Tatto

<sup>13</sup> Harumi Ikei, Chorong Song, Yoshifumi Miyazaki, *Physiological effects of touching wood in «International Journal of Environmental Research and Public Health»*, vol. 14, 2017.

<sup>14</sup> Ian Baldwin, Rayko Halitschke, Anja Paschold, Caroline von Dahl, Catherine Preston, *Volatile signaling in plant-plant interactions: "talking trees" in the genomics era*, in «Science», vol. 311, 2006, pp. 812-815.

<sup>15</sup> Michele Antonelli, Davide Donelli, Grazia Barbieri, Marco Valussi, Valentina Maggini, Fabio Firenzuoli, *Aromaterapia naturale: benefici dell'aria forestale sulla salute* in Francesco Meneguzzo e Federica Zabini (a cura di), *Terapia Forestale. Una collaborazione tra il Club Alpino Italiano il Consiglio Nazionale delle Ricerche*, Roma: Cnr Edizioni, 2020.

<sup>16</sup> Michele Antonelli, Davide Donelli, Grazia Barbieri, Marco Valussi, Valentina Maggini, Fabio Firenzuoli, *Composti organici volatili forestali e loro effetti sulla salute umana: una revisione all'avanguardia* in «International Journal of Environmental Research and Public Health», vol. 17, 2020.

Studi eseguiti in ambiente controllato hanno dimostrato che la stimolazione di superfici di alcuni tipi di legno, attraverso il tatto, inducono rilassamento, riduzione del battito cardiaco e della pressione arteriosa.

Nonostante gli studi fatti siano stati realizzati in laboratorio, gli stessi risultati sono facilmente ottenibili anche in ambienti forestali.<sup>13</sup>

## Olfatto

Gialberi, le foglie e i tessuti vegetali rilasciano nell'atmosfera COV cioè Composti Organici Volatili, queste particelle costituiscono un vero e proprio linguaggio chimico delle piante basato su emissione, trasporto e assorbimento, oltre a costituire la loro difesa contro predatori erbivori. I COV sono costituiti da composti a basso peso molecolare (d-Limonene,  $\alpha$ -Pinene,  $\beta$ -Pinene,  $\beta$ -Myrcene e Camfene) con effetti biologici, se inalati, con azione antiossidante, antinfiammatoria, ansiolitica e balsamica, oltre a indurre rilassamento psico-fisico e miglioramento del tono dell'umore.<sup>14-15-16</sup>

## Turismo del benessere

Oltre ai benefici già elencati, visitare foreste e aree naturali ha un impatto economico positivo sia in ambito turistico sia per quanto riguarda il risparmio potenziale per il sistema sanitario nazionale.

Il report **Exploring Health Tourism**, pubblicato dall'Organizzazione Mondiale del Turismo (UNWTO) e l'European Travel Commission (ETC) nel 2018, si configura come uno dei primi tentativi di definire il concetto di turismo sanitario.

Il documento propone una distinzione tra turismo del benessere e turismo medico.

Al primo appartengono attività che mirano al miglioramento e bilancio del benessere fisico, mentale, emotivo e intellettuale mentre il turismo medico comprende servizi di guarigione, riabilitazione e trattamenti di cura.

Le politiche e le iniziative nazionali e regionali stanno sempre più aprendo la strada al turismo sanitario tramite investimenti e incentivi.

Alle strutture termali e cliniche specializzate, oggi si affiancano percorsi naturalistici e forestali dedicati.<sup>17</sup>

Il turismo è influenzato da diversi megatrend: crescita della popolazione, cambio dei modelli di lavoro, nuove tecnologie, urbanizzazione, cambiamento climatico, moda e crescente interesse per una vita in simbiosi con l'ambiente naturale. Questi fattori definiscono le scelte dei viaggiatori.<sup>18-19</sup>

Per generare un'offerta turistica forestale adeguata a tutti gli utenti in una logica di inclusività, è necessaria la formazione di nuove competenze come, per esempio, le guide forestali e la certificazione di strutture adeguate. Inoltre, è fondamentale il dialogo e collaborazione tra autorità, comunità locali, organizzatori e privati al fine di coinvolgere diversi stakeholder.<sup>20</sup>

<sup>17</sup> Promisalute, <https://www.promisalute.it>, (consultato Aprile 2021).

<sup>18</sup> Ralf Buckley, Ulrike Gretzel, Daniel Scott, David Weaver, Susanne Becken, *Tourism megatrends* in «Tourism Recreation Research», vol. 40, 2015, pp. 59–70.

<sup>19</sup> Yasmine Elmahdy, Jan Vidar Haukeland, Peter Fredman, *Tourism megatrends, a literature review focused on nature-based tourism*, 2017.

<sup>20</sup> Norwegian University of Life Sciences NMBU, <https://nmbu.brage.unit.no>, (consultato Aprile 2021).

## 6.2 Outdoor Education

La recente pandemia globale ha ridefinito anche il modo di fare didattica, le lezioni all'aperto sono ultimamente preferite alle lezioni in presenza in aula in quanto favoriscono il distanziamento e riducono la probabilità di contagio.

Oggi interfacciarsi con la natura e l'aria aperta riguarda sicurezza, benessere e salute.

L'Outdoor Education è direttamente correlata all'ambito dell'educazione sperimentale, una filosofia di apprendimento basata sulla promozione di esperienze dirette con lo scopo di sviluppare nuove competenze.<sup>21</sup>

Il concetto di Outdoor Education connota un'ubicazione distintiva e differente dai luoghi educativi tradizionali come scuole o istituti.<sup>22</sup>

Alberi, cespugli e sottobosco si sostituiscono alle pareti delle aule scolastiche.

Viene proposto uno stile di vita alternativo a quello attuale, sedentario caratterizzato da connessioni telematiche veloci.

Oltre ai vantaggi già trattati nel capitolo sulla Forest Therapy, l'introduzione di questo modello educativo, in ambito scolastico, secondo alcuni studi porterebbe a vantaggio di riduzione di deficit d'attenzione e riduzione di obesità.

L'Outdoor Education, nonostante possa sembrare un fenomeno innovativo, è radicato nella storia pedagogica, la didattica all'aria aperta si basa sul dualismo di apprendimento fisico e intellettuale.<sup>23-24</sup>

Una delle prime iniziative di apprendimento in luogo naturale avvenne in Italia nel 1917 per volontà dell'assessore alla scuola Mario Longhena e dal sindaco di Bologna Francesco Zanardi. Si tratta della Scuola all'aperto Fortuzzi situata all'interno dei Giardini Margherita del capoluogo emiliano.

Ma è soprattutto in Nord Europa che si diffonde rapidamente questo nuovo modello scolastico, dove la vita a contatto con la natura riveste un ruolo molto rilevante, le prime scuole nel bosco nascono in Danimarca e Norvegia.

Udeskole è un concetto scandinavo che identifica la pratica della scuola all'aperto, è traducibile letteralmente come "scuola all'aperto", gli asili nel bosco danesi vennero successivamente denominati Skovbørnehave.

<sup>21</sup> Marco Cannas, Eleonora Moi, *La scuola nel bosco architettura e Outdoor Education per l'infanzia*, tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile, a.a. 2017-2018, rel. Prof.ssa Francesca Thiebat, Prof. Lorenzo Savio.

<sup>22</sup> Ken Gilbertson, Timothy Bates, Alan Ewert, Terry McLaughlin, *Outdoor Education: Methods and Strategies*, 2005.

<sup>23</sup> Heidi Campbell, *Landscape and Child Development. A Design Guide for Early Years-Kindergarten Play-Learning Environments*, 2013.

<sup>24</sup> Orizzonte Scuola Notizie, <https://www.orizzontescuola.it>, (consultato Aprile 2021).

La nascita del primo asilo nel bosco è attribuibile a Ella Flatau che in Danimarca, in maniera spontanea, diede vita nel 1950. Da una recente indagine, oggi il 28% delle scuole danesi praticano udeskole (scuola all'aperto).<sup>25-26</sup> Goesta Frohm, promotore di una didattica in ambiente naturale e fondatore del primo asilo nel bosco svedese, spiega come questo approccio spinga i bambini ad amare la natura prendendosene cura in una logica di rispetto e salvaguardia naturale.

In Svezia le scuole nel bosco vengono anche denominate **Ur och Skur** traducibile come "con il buono e cattivo tempo", questo motto spiega l'approccio di promozione della vita all'aperto indipendentemente dalle condizioni atmosferiche e climatiche, pioggia o neve, infatti, non sono percepiti come un ostacolo all'esplorazione.<sup>27</sup>

In Germania si diffondono soprattutto negli anni 90 del Novecento con la denominazione **waldkindergarten**, parallelamente in Inghilterra, negli stessi anni, proliferano le **forest school**, entrambe le scuole si ispirano al modello danese.

Tra gli obiettivi dell'Outdoor Education ci sono la cura e il rispetto dell'ambiente e della natura volta a sensibilizzare ad atteggiamenti responsabili verso l'ecosistema.

Nonostante i programmi educativi all'aria aperta siano sponsorizzati da scuole primarie, secondarie, licei e università, ad oggi non esiste una standardizzazione di questa pratica né una definizione univoca sul concetto di Outdoor Education.<sup>28</sup>

Nel 1958 George Donaldson e Luis Donaldson definiscono l'Outdoor Education come:

«Outdoor Education is education in, about and for the outdoors».<sup>29</sup>

Per descrivere questo innovativo metodo di apprendimento hanno usato tre preposizioni, più precisamente l'utilizzo di "in" fa riferimento al luogo dove si svolge questa pratica cioè in un ambiente esterno: un cortile di una scuola, un parco cittadino o una foresta.

"About" fa riferimento al tema che è conoscere la natura e i suoi meccanismi, invece "for" fa riferimento allo scopo che è correlato all'apprendimento delle risorse naturali e allo sviluppo cognitivo e motorio.

<sup>25</sup> Children Nature Network, <https://www.childrenandnature.org>, (consultato Marzo 2021).

<sup>26</sup> Peter Bentsen, Frank Jensen, Erik Mygind, Thomas Randrup, *The extent and dissemination of udeskole in Danish schools in «Urban Forestry & Urban Greening»*, vol. 9, pp. 235-243.

<sup>27</sup> Michela Schenetti, Irene Salvaterra, Benedetta Rossini, *La scuola nel bosco. Pedagogia, didattica e natura*, Trento: Erickson, 2015.

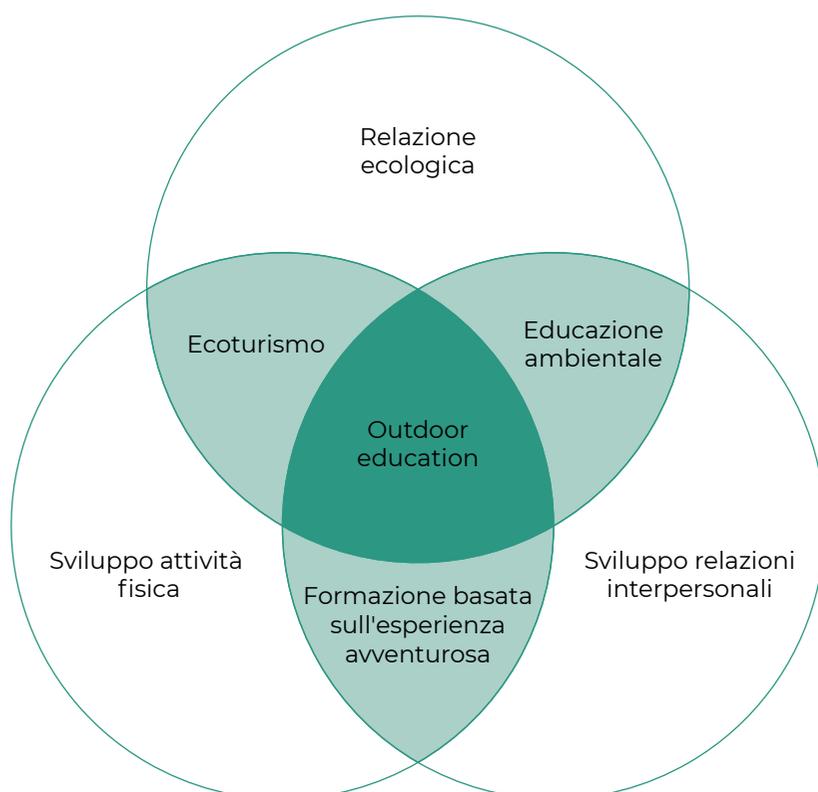
<sup>28</sup> Phyllis Ford, *Outdoor Education: Definition and Philosophy*, Washington: ERIC Clearinghouse, 1986, p.15.

<sup>29</sup> George Donaldson, Luis Donaldson, *Outdoor Education: a definition in «Journal of Health, Physical Education and Recreation»*, vol. 29, 1958, p. 17.

Simon Priest, professore presso l'università dell'Oregon, trenta anni dopo la definizione dei Donaldson descrive l'Outdoor Education come un processo di educazione esperienziale in cui l'apprendimento si basa sui rapporti tra persone e risorse naturali. Questa definizione è fondata su sei principi:

- 1 L'educazione all'aria aperta è un metodo di apprendimento.
- 2 Il processo di apprendimento è esperienziale.
- 3 L'educazione avviene principalmente ma non esclusivamente in ambiente esterno.
- 4 L'utilizzo dei sensi vista, udito, tatto, gusto e olfatto è indispensabile per coinvolgere i domini cognitivi e motori.
- 5 L'apprendimento si basa su argomenti curriculari interdisciplinari.
- 6 L'apprendimento si basa sulla creazione di relazioni non solo tra persone come cooperazione, comunicazione o interazione all'interno di gruppi, ma anche come ci si relaziona con se stessi e all'ecosistema che ci circonda.<sup>30</sup>

**Fig. 5 Educazione sperimentale**



<sup>30</sup> Simon Priest, *Redefining Outdoor Education: a matter of many relationships* in «Journal of Environmental Education», vol. 17, 1986.

**Fig. 5** Diagramma che illustra come l'Outdoor Education sia la mescolanza di varie discipline comprese nell'ambito dell'educazione sperimentale. Elaborato tratto dal libro *Outdoor Education: Methods and Strategies* di Ken Gilbertson, Timothy Bates, Alan Ewert e Terry McLaughlin.

L'Outdoor Education è una pratica di insegnamento e apprendimento che enfatizza le esperienze multisensoriali dirette, realizzate individualmente e collettivamente in un ambiente naturale sempre più importante in una società prevalentemente urbanizzata. L'Outdoor Education possiede tre principali aree di competenza:

1 Sviluppo di abilità fisiche conseguenti ad attività finalizzate ad uso di strumenti e coordinazione del corpo.

2 La crescita interpersonale, lo sviluppo della consapevolezza, delle capacità degli studenti e la creazione di gruppi dove sviluppare competenze e relazioni.

3 Comprensione del funzionamento di meccanismi naturali e concetti ecologici.

L'educazione ambientale è molto importante, soprattutto nel contesto odierno. William Stapp, professore presso l'università del Wisconsin, nel 1969 definisce educazione ambientale come:

«L'educazione ambientale è finalizzata a produrre una cittadinanza consapevole dell'ambiente biofisico e dei problemi associati, consapevole di come aiutare a risolvere questi problemi e motivata a lavorare per la loro soluzione».<sup>31</sup>

Negli anni 70 del Novecento emerge un dibattito sull'educazione all'aperto intesa nella sua forma contemporanea, in quegli anni si stava sviluppando e riconoscendo una forma educativa che interessava l'autocoscienza, il lavoro di squadra e la coscienza ambientale. Nel 1975 in una conferenza tenutasi a Dartington e convocata dal dipartimento per le scienze e l'educazione del Regno Unito emergono tre componenti comunemente accettati e fondamentali per l'esperienza educativa all'aperto: sé, gli altri e la natura.<sup>32-33</sup>

Dick Prouty, Paul Radcliffe e Colin Mortlock, scrittori con diversi background formativi provenienti da contesti geografici e culturali differenti, concordano affermando che lo scopo dell'educazione all'aria aperta è quello di facilitare il raggiungimento del potenziale umano attraverso l'esperienza dell'avventura all'aria aperta.<sup>34</sup>

<sup>31</sup> Simona Rosace, *La rilevanza dell'educazione ambientale nelle scuole. Monitoraggio di progetti e loro efficacia in termini di modifica dei comportamenti*, tesi di Laurea Magistrale in Scienze Ambientali, a.a. 2013-2014, rel. Prof.ssa Marta Pappalardo.

<sup>32</sup> Nicholas Gair, *Outdoor Education: Theory and Practice*, Continuum International Publishing Group, 1997.

<sup>33</sup> Brian Wattchow, Mike Brown, *A Pedagogy of Place: Outdoor Education for a Changing World*, Monash University Publishing, 2011.

<sup>34</sup> Brian Wattchow, Mike Brown, *A pedagogy of place: outdoor education for a changing world*, Monash University Publishing, 2011.

## 6.3 Architetture per l'educazione all'aperto

Le architetture o piccoli padiglioni per l'Outdoor Education hanno lo scopo di valorizzare le esperienze all'aria aperta, avamposti nel bosco, aree di sosta lungo sentieri forestali o basi per riporre beni personali; ripararsi dalle intemperie e riposarsi accompagnano l'esperienza educativa.

L'approccio esigenziale-prestazionale adottato anche nella nostra proposta progettuale, ha tenuto conto sia delle esigenze dei fruitori, alunni, educatori e collaboratori scolastici, che del bosco.

### Hedge School

Architecture Practice + Experimentation

Area: 65 m<sup>2</sup>

2015

Ideato dallo studio Architecture Practice + Experimentation per una scuola d'infanzia a Carlow, in Irlanda, il padiglione Hedge School si propone come ambiente per conciliare la didattica con la natura e stimolare la fantasia dei bambini per un apprendimento in relazione con la vegetazione circostante in un'ottica di intuitività, gioco e interazione.

Elementi in legno disposti a cerchio definiscono lo spazio del padiglione, gli alunni imparano a coltivare il proprio cibo e seguire la crescita stagionale delle piante.

Lo spazio offerto dal padiglione consente differenti utilizzi, oltre alle lezioni all'aperto, infatti, i bambini possono riposare, giocare o cimentarsi in spettacoli.

È un'architettura versatile che si adatta alle attività dei suoi utenti.

La realizzazione di questo padiglione è avvenuta durante l'orario scolastico permettendo così ai bambini di osservare le fasi della sua crescita e montaggio, coinvolgendo la loro partecipazione nella fase di semina e interrimento delle specie vegetali.

I principali materiali adottati sono legno compensato per la struttura e sedute e fili d'acciaio per la creazione di telai utili alla crescita delle piante.<sup>35-36</sup>

<sup>35</sup> Domus, <https://www.domusweb.it>, (consultato Febbraio 2021).

<sup>36</sup> Dezeen, <https://www.dezeen.com>, (consultato Febbraio 2021).



Fig. 6

Fig. 7



Fig. 6 Foto del padiglione Hedge School in <https://www.domusweb.it>.

Fig. 7 Foto del padiglione Hedge School, dettagli della struttura lignea intervallata da portavasi sospesi. In <https://www.dezeen.com>.

## Evans Tree House

Modus Studio  
Area: 591 m<sup>2</sup>  
2018

L'Evans Tree House, progettata dallo Modus Studio, è stata realizzata all'interno del Garvan Woodland Gardens, un giardino botanico di 85 ettari vicino alla città di Hot Springs, in Arkansas.

La casa sull'albero è destinata ai bambini e scolaresche, lo scopo dello studio di progettazione statunitense è quello di riportare i bambini alla scoperta del bosco per un'esperienza educativa interattiva.

L'edificio si eleva da terra tramite sei coppie di colonne in acciaio con un'altezza che varia dai 4 ai 7,6 metri per adattarsi alla conformazione irregolare del terreno e avvicinare i visitatori alle chiome degli alberi così da mimetizzare l'architettura tra le fronde delle querce e pini presenti.

La Evans Tree house è caratterizzata da una forma sinuosa e dinamica, lo spazio è scandito da 103 archi in pino giallo meridionale e 10 in acciaio, uniti tramite giunzioni a secco, che generano una ritmica alternata di pieni e vuoti. La casa sull'albero risulta permeabile all'ambiente esterno ed esposta ad intemperie.

Tutti gli elementi dell'involucro si collegano ad una spina centrale in acciaio che percorre la lunghezza dell'edificio, costituendo la struttura portante che scarica il carico sui pilastri.

Il team di progettisti ha inserito delle aperture per favorire la visione della foresta consentendo ai visitatori di sentirsi intimamente connessi con quest'ultima.<sup>37-38</sup>

<sup>37</sup> Dezeen, <https://www.dezeen.com>, (consultato Febbraio 2021).

<sup>38</sup> Modus Studio, <http://www.modusstudio.com>, (consultato Febbraio 2021).

**Fig. 8** Foto dell'interno dell'Evans Tree House in <https://www.dezeen.com>.





Fig. 9



Fig. 10

Fig. 9-10 Foto dell'Evans Tree House in <https://www.dezeen.com>.

## IMJ Tree House

Deborah Warschawski, Ifat Finkelman

Area: 150 m<sup>2</sup>

2014

L'intervento si colloca all'interno del progetto di rinnovamento del cortile del Young Wing for Art Education, un'ala dell'Israel Museum a Gerusalemme.

Il grande pino preesistente è il fulcro del progetto. Nonostante il tronco non sia lineare ma presenti una curvatura e torsione irregolare, è l'elemento attorno a cui gli architetti Deborah Warschawski e Ifat Finkelman hanno progettato una struttura coperta ad uso di spazio ricreativo per bambini.

Gli architetti hanno creato una piccola casa sull'albero dove i bambini possono giocare, arrampicarsi ed esplorare.

L'edificio risulta rialzato da terra consentendo così una vista privilegiata sul cortile del museo ed è raggiungibile tramite una rampa inclinata.

I materiali utilizzati sono legno per rivestimento e finitura in continuità con la presenza arborea mentre travi e pilastri in acciaio ne costituiscono la struttura portante.<sup>39</sup>

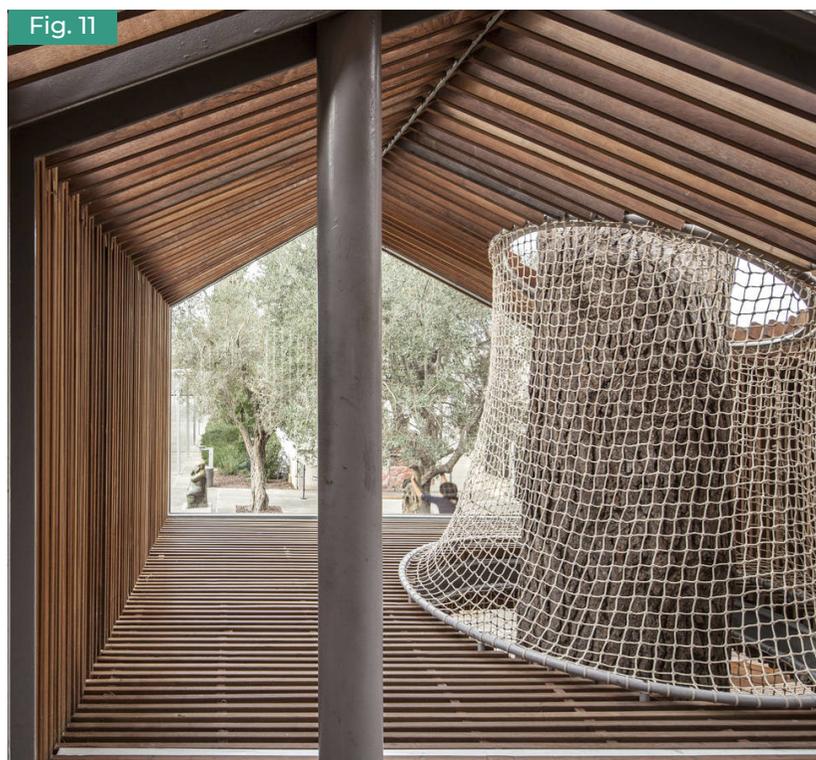


Fig. 11

<sup>39</sup> Area, <https://www.area-arch.it>, (consultato Marzo 2021).

**Fig. 11** Interno del IMJ Tree House. In <https://www.dezeen.com>.



Fig. 12



Fig. 13

Fig. 12-13 Fotografie del IMJ Tree House in <https://www.area-arch.it>.

# 07

## Bando di concorso per lo Spazio Thetis

di  
Mohamed Yasser Hariss

Il bando di concorso evidenzia gli aspetti principali da rispettare per la realizzazione di una Tiny House nel giardino dello Spazio Thetis, situato a Venezia. Il progetto riprende il tema della Biennale lasciando libero utilizzo dell'area entro i limiti stabiliti dal bando. Nel seguente capitolo vengono riportate le specifiche caratteristiche progettuali esposte dal bando di concorso seguite da una breve descrizione dello Spazio Thetis.

Fotografia del giardino dello Spazio Thetis  
presso l'Arsenale Novissimo.  
In <https://www.thetis.it>.



## 7.1 Tema del bando

Il progetto per la “Tiny House/Shelter” parte da un’iniziativa promossa dallo Spazio Thetis in concomitanza della 17esima Biennale Internazionale di Architettura di Venezia nel 2020. Il tema della Biennale “How will we live together?” (Come vivremo insieme?) mette in luce una serie di iniziative per affrontare le disuguaglianze politiche, sociali ed economiche che condizionano la società nella quale viviamo.<sup>1</sup>

L’Architettura assume un ruolo importante nell’affrontare questi cambiamenti attraverso progetti volti allo scambio interpersonale fra diverse figure professionali e utenti. La ricerca del contatto è l’interesse sul quale il curatore della mostra Hashim Sarkis si sofferma:

«Abbiamo bisogno di un nuovo contratto spaziale. In un contesto caratterizzato da divergenze politiche sempre più ampie e da disuguaglianze economiche sempre maggiori, chiediamo agli architetti di immaginare degli spazi nei quali vivere generosamente insieme».<sup>2</sup>

L’attuale pandemia globale ha sicuramente rafforzato il tema della mostra in seguito alla sua posticipazione nel 2021. I rapidi cambiamenti che interessano il pianeta quali il riscaldamento globale, le disuguaglianze razziali e i massicci spostamenti delle popolazioni, contribuiscono al pensiero di un cambiamento verso un futuro più sostenibile senza divisioni dettate dalle politiche odierne.<sup>3</sup>

Analogamente, i progetti delle Tiny House sono state oggetto di grande studio negli ultimi anni specialmente per affrontare problematiche legate alle situazioni di emergenza come alluvioni o terremoti. La ricerca del comfort ha ampliato la visione su queste tipologie di case trovando risposta nelle specifiche scelte di vita dei singoli soggetti. Il rifugio nella natura, l’allontanamento dalla confusione delle città o un semplice riparo ipertecnologico, sono alcuni dei motivi per il quale si è posto l’interesse sulle mini-case.

<sup>1</sup> Architetti, <https://www.architetti.com>, (consultato Giugno 2021).

<sup>2</sup> La Biennale di Venezia, <https://www.labiennale.org>, (consultato Giugno 2021).

<sup>3</sup> Archiportale, <https://www.archiportale.com>, (consultato Giugno 2021).

La sostenibilità gioca un ruolo fondamentale quando si entra a contatto con la natura. Si assiste ad una mimesi architettonica dettata dall'uso dei materiali, dalle forme semplici e minimali o addirittura organiche, quasi a confondersi e a inserirsi nell'ambiente in modo naturale. Sarà infatti questo il pensiero che porterà alla definizione del concept di progetto in riferimento alle condizioni e ai limiti imposti dal bando di concorso.

## Spazio Thetis

Il giardino dello Spazio Thetis, situato nell'antico Arsenale di Venezia, è un'area dove vengono organizzate mostre e incontri da più di vent'anni. Con i suoi 8000 metri quadrati di spazio espositivo, interposto fra ambienti interni ed esterni, lo Spazio Thetis è uno dei poli espositivi di rilievo durante la mostra della Biennale. Ogni anno un costante afflusso di persone visita questo spazio attirata dai capannoni di matrice industriale e dal grade giardino composto da sentieri, alberi e opere d'arte, rendendolo il luogo ideale dove collocare le Tiny House, creare incontri e dibattiti e presentare progetti.<sup>4</sup>

L'area è facilmente accessibile tramite il servizio di trasporto via mare o direttamente dall'Arsenale della Biennale.

<sup>4</sup> Thetis, <http://www.thetis.it> (consultato Giugno 2021).

**Fig. 1** Foto del giardino dello Spazio Thetis in <https://www.fg-comunicazione.it>.



Fig. 1

Lo sviluppo dell'idea di progetto è favorita dallo spazio all'aperto e dalla presenza di diverse specie arboree. L'albero sarà infatti uno degli elementi più importanti che caratterizzerà il progetto proposto nella tesi in quanto determinerà le scelte compositive con le quali verrà sviluppata la forma. L'architettura in simbiosi con la natura può assumere diversi aspetti legati al contesto ambientale. Secondo una logica computazionale e generativa, lo sviluppo della geometria da noi proposta avrà un rapporto stretto e diretto con l'albero in base alle sue proprietà formali.

## Vincoli progettuali

Il bando di concorso proposto dallo Spazio Thetis non impone una rigida serie di vincoli, anzi, lascia libero spazio alla creatività avanzando come limite solo lo spazio entro il quale la Tiny House dovrà svilupparsi. L'area di interesse è di 20 metri quadrati, con possibilità di ampliamento, e non viene specificata la destinazione d'uso, purché rispetti il tema centrale proposto dalla Biennale "How will we live together?".

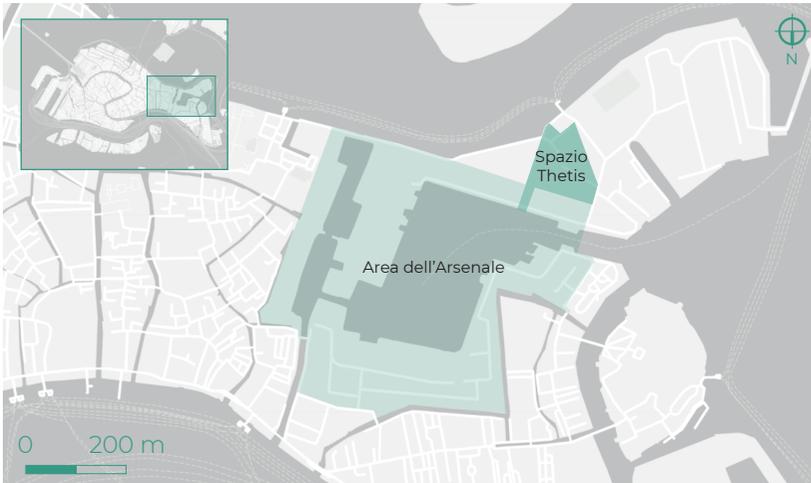
Avendo come punto di riferimento il bando di concorso, gli ulteriori vincoli progettuali sorgono nel momento in cui viene definita la destinazione d'uso e la relazione con possibili elementi del contesto. Come accennato precedentemente, l'intento del progetto è quello di realizzare un'architettura in simbiosi con l'albero, pertanto quest'ultimo assume un ruolo fondamentale e vincola la forma alle proprietà intrinseche della specie arborea.

La forma, l'altezza e la chioma sono solo alcuni degli elementi da tenere in considerazione quando ci si relaziona con l'albero e rappresentano qualità uniche delle specifiche specie arboree. Non esistono piante uguali con le stesse proprietà e per far fronte a delle scelte progettuali è opportuno considerare preventivamente gli aspetti che caratterizzano l'albero scelto.

Dal momento che non è stato possibile effettuare sopralluoghi per mappare uno dei possibili alberi, ai fini del progetto, è stato scelto un pioppo bianco selvatico per le analisi.

## Inquadramento territoriale

Fig. 2



**Fig. 2** Inquadramento territoriale del giardino dello Spazio Thetis nella città di Venezia. Elaborato personale.

# Sezione 3

## Il progetto



# 08

## Obiettivi di progetto e analisi profili utenza

di

Riccardo Grecu e Mohamed Yasser Hariss

La base su cui si sviluppa la proposta progettuale ha inizio con la definizione degli obiettivi e la rilevazione delle esigenze dei fruitori.

La preesistenza arborea ha un ruolo centrale, l'albero è il fulcro del progetto e dà forma al padiglione in base alla sua conformazione morfologica, inoltre, la definizione degli attori coinvolti, con le loro attività ed esigenze, è un passaggio imprescindibile per il progetto.

L'estrapolazione e raccolta dei dati ha condotto infine all'individuazione dei parametri, elementi essenziali per la successiva elaborazione con software parametrici e generativi. Questi ultimi contribuiranno all'elaborazione della proposta progettuale.

Bambino intento ad arrampicarsi su un albero. Foto di Annie Spratt in <https://unsplash.com>.



## 8.1 Obiettivi e temi di progetto

Il progetto ha come scopo la valorizzazione dell'ambiente naturale, del rapporto uomo-albero e la sensibilizzazione dei fruitori a vivere all'aria aperta evidenziandone i benefici fisiologici e psicologici.

Data la varietà di destinazioni d'uso del padiglione, l'utenza risulta ampia e comprende non solo scolaresche e insegnanti per attività di Outdoor Education ma anche turisti e viaggiatori che desiderano sostare usando il padiglione come avamposto nel bosco.

In un ottica di attenzione alla natura la scelta del materiale è ricaduta sul legno, poiché ecologico, versatile e con basso impatto ambientale. Le successive analisi sull'impatto ambientale dei materiali, ci permetteranno di selezionare la tipologia di legno più adatta valutando non solo la qualità estetica e meccanica ma anche la sua impronta ecologica.

Fig. 1



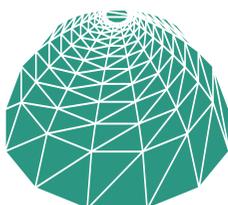
### Tema:

Valorizzare la  
preesistenza arborea e  
sensibilizzare il  
rapporto uomo-natura



### Destinazione d'uso:

Spazio per  
apprendimento e  
Smart Working



### Strumenti:

Software di  
modellazione  
parametrica e  
Generative Design



### Materiale:

Prevalente utilizzo  
del legno e derivati

Fig. 1 Schema rappresentativo dei temi e degli strumenti chiave per la realizzazione del progetto. Elaborato personale.

La centralità dell'albero è fondamentale, infatti si è voluto dare particolare rilevanza alla preesistenza arborea.

L'albero stesso definisce e dà forma al padiglione in base alla conformazione morfologica della sua chioma e del fusto.

Grazie all'adozione di strumenti di modellazione parametrica avanzati siamo stati in grado di costruire un modello adattabile ai parametri dimensionali dell'albero generando così un padiglione versatile per ogni tipo di specie arborea.

La strategia utilizzata ci permette di individuare la configurazione geometrica più adatta all'albero e al profilo d'utenza basandoci sull'indagine dei parametri esplicitabili quantitativamente.

L'approccio bio-ispirato è una strategia che prende come modello la natura da cui trarre ispirazione per trovare soluzioni a diversi problemi.

Dato il contesto del progetto, la strategia bio-ispirata è stata utile per individuare la conformazione del padiglione.

Il nostro intento non è quello di mimetizzare il padiglione nella natura utilizzando forme usuali o geometrie pure ma individuare strutture e aggregazioni naturali da riproporre attraverso pattern geometrico-matematici come la tassellatura di Voronoi o la triangolazione di Delaunay.

I pattern sono facilmente gestibili grazie ai software di modellazione.

## 8.2 Workflow

Il processo progettuale si divide in tre fasi partendo dalle analisi delle esigenze e prestazioni, legate all'utenza e in relazione al sito, i requisiti progettuali, che determinano i vincoli definiti dal concept per finire con l'ingegnerizzazione, in seguito alla verifica delle prestazioni. Il processo non è lineare ma dipende dai risultati ottenuti nella determinazione della geometria di progetto. Se i risultati vengono verificati e rispettano le esigenze precedentemente imposte si può a quel punto passare all'ingegnerizzazione, altrimenti è necessario ridefinire i parametri entro il quale svolgere le analisi.

Fig. 2

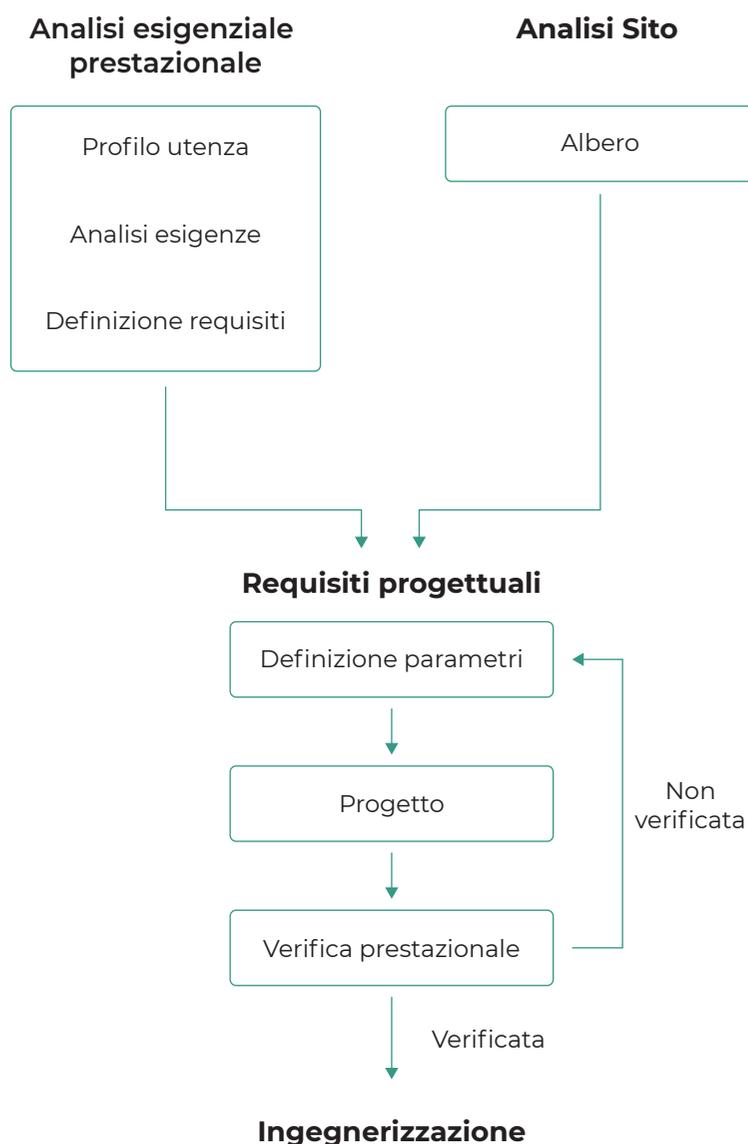


Fig. 2 Schema delle fasi di progetto dalle analisi preliminari del sito e delle esigenze/prestazioni, fino all'ingegnerizzazione. Elaborato personale.

## 8.3 Profilo utenza: attività, esigenze e requisiti

La prima fase del processo progettuale è opportuna per definire gli attori coinvolti nel progetto secondo le destinazioni d'uso definite. L'utenza comprende l'insieme di tutti gli attori direttamente attivi al montaggio/manutenzione e alla fruizione della struttura stessa. Nello schema riportato di seguito vengono elencati gli utenti definendo le principali attività svolte in relazione al progetto, le esigenze e i rispettivi requisiti architettonici.

Fig. 3

Docente		
Insegnamento	Facilitare e guidare l'apprendimento dei bambini	L'ambiente deve disporre del materiale necessario per la didattica
Supervisione dei bambini	Controllare che le attività siano svolte in sicurezza	L'area non deve impedire il controllo visivo dei bambini

Bambini		
Apprendimento	Garantire l'educazione e lo studio all'interno della struttura	Lo spazio deve disporre di apposite attrezzature quali sedute e piani di appoggio
Ricreazione	Permettere lo svago e il gioco sia al chiuso che all'aperto	La sicurezza dei bambini deve essere gestita dal docente e garantita dalla struttura
Esplorazione e studio natura	Stimolare la curiosità dei bambini verso l'ambiente naturale	L'ambiente deve mantenere uno stretto legame con il paesaggio
Fruizione	Permettere il libero accesso anche ai bambini con disabilità	La struttura deve garantire anche l'accessibilità ai bambini con disabilità secondo la normativa vigente

Fig. 3 Tabella delle attività, esigenze e requisiti dei principali utenti coinvolti nel progetto. Elaborato personale.

<b>Visitatori esterni</b>		
Contemplazione	Sviluppare un'esperienza plurisensoriale	Creare una struttura in grado di valorizzare la natura e suscitare emozioni
Cura	Migliorare le condizioni di salute e psichiche delle persone	L'ambiente deve essere in grado di promuovere la relazione fra uomo e natura attraverso la Forest Therapy

<b>Smart Worker</b>		
Lavoro da remoto	Garantire la presenza di uno spazio versatile allo svolgimento del lavoro da remoto	La struttura deve essere munita di sedute, di piani d'appoggio per gli apparecchi elettronici e di corrente

<b>Addetti alla manutenzione</b>		
Montaggio e manutenzione	Disporre delle specifiche apparecchiature	Garantire la sicurezza nel montaggio e nella manutenzione della struttura rispettando le condizioni ambientali del sito

In riferimento alle esigenze di tutti gli utenti, ad eccezione degli addetti alla manutenzione, la struttura deve poter garantire il comfort e la sicurezza in fase di utilizzo. A tale proposito è importante definire un forte legame compositivo con l'albero valorizzandone la presenza e rendendolo parte integrante e funzionale dell'intero sistema. Anche la materialità del legno contribuisce ad un comfort visivo e tattile, specialmente per i bambini durante la fase di crescita, favorendo un'esperienza plurisensoriale accompagnata dai suoni della natura e dal contatto visivo con l'ambiente.

La sicurezza del complesso deve poter rispettare le norme vigenti garantendo uno spazio fruibile anche agli utenti con disabilità. La circolazione deve essere facilitata allo stesso modo anche all'interno della struttura.

## 8.4 Riferimenti normativi

In Italia l'accessibilità ai vari locali è normata dalla **Legge 13/1989** insieme al **Decreto Ministeriale D.M. 14 Giugno 1989, n. 236**. All'articolo 2 del decreto si fa riferimento alla definizione di accessibilità:

«Per accessibilità si intende la possibilità, anche per persone con ridotta o impedita capacità motoria o sensoriale, di raggiungere l'edificio e le sue singole unità immobiliari e ambientali, di entrarvi agevolmente e di fruirne spazi e attrezzature in condizioni di adeguata sicurezza e autonomia.»<sup>1</sup>

I principali riferimenti alla normativa, secondo il progetto proposto, riguardano il dimensionamento degli spazi interni per la fruizione delle persone (percorsi orizzontali) anche con sedia a ruote, le modalità di progettazione della rampa e le scale. Nello schema riportato di seguito vengono mostrati i valori dimensionali da rispettare e gli spazi di manovra per persone con sedie a ruota.

### Riferimenti normativi dimensionali

Fig. 4

Larghezza minima corridoi e percorsi:	100 cm
Presenza pianerottoli (rampa):	ogni 10 m
Larghezza minima rampa per un senso di marcia:	90 cm
Larghezza minima rampa per doppio senso di marcia:	150 cm
Pendenza massima rampa:	8%

<sup>1</sup> Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibili in <https://www.mit.gov.it>.

### Spazi di manovra sedie con ruota

Fig. 5

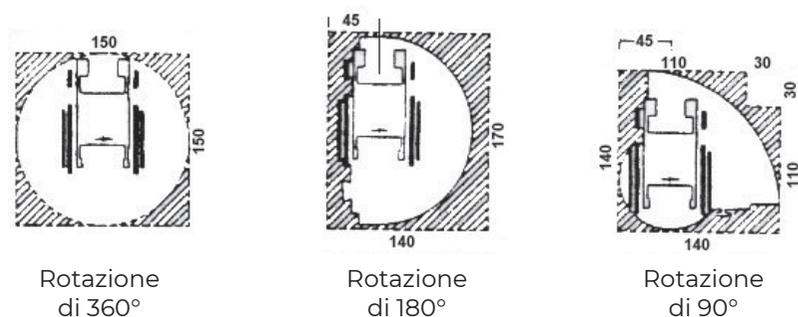


Fig. 4 Schema raffigurante i limiti dimensionali di riferimento secondo il D.M. 14 Giugno 1989, n. 236. Elaborato personale.

Fig. 5 I.T.I. Marconi, <http://www.itimarconi.ct.it>.

## 8.5 L'albero

Come già descritto l'albero è il fulcro del nostro progetto, attorno al quale si sviluppa il padiglione proposto. Analizzare e comprendere le esigenze della pianta è necessario per garantire la sua salute e sviluppo e di conseguenza la stabilità strutturale e agibilità della nostra architettura.

Il biologo Stefano Mancuso, direttore del Laboratorio Internazionale di Neurobiologia Vegetale (LINV) dell'Università degli Studi di Firenze, scrive:

«Le piante sono organismi multicellulari eucarioti e fotosintetizzanti, caratterizzati, pur con alcune eccezioni, da una parte aerea e da un sistema radicale; [...] per adattarsi alle mutevoli condizioni ambientali senza potersi spostare, hanno sviluppato la possibilità di muoversi attraverso la crescita, dando prova di straordinaria plasticità.

L'insieme delle risposte all'ambiente che si manifestano un movimento sono comunemente note con il nome di tropismi.

Sono caratterizzati da una marcata crescita direzionale degli organi, soprattutto della radice, in risposta a stimoli esterni, i principali fra i quali sono la luce (fototropismo), la gravità (gravitropismo), il contatto (tigmotropismo), il gradiente di umidità (idrotropismo), l'ossigeno (ossitropismo) e il campo elettrico (elettotropismo)».<sup>2</sup>

Gli alberi e le piante non sono immobili, anzi, reagiscono agli stimoli esterni, questa caratteristica è stata presa in considerazione nella fase progettuale, infatti, sono state adottate strategie e tecniche non invasive nei confronti della pianta rispettando il naturale processo vegetativo. La proposta non prevede forature del tronco o strutture che ne limitano la crescita.

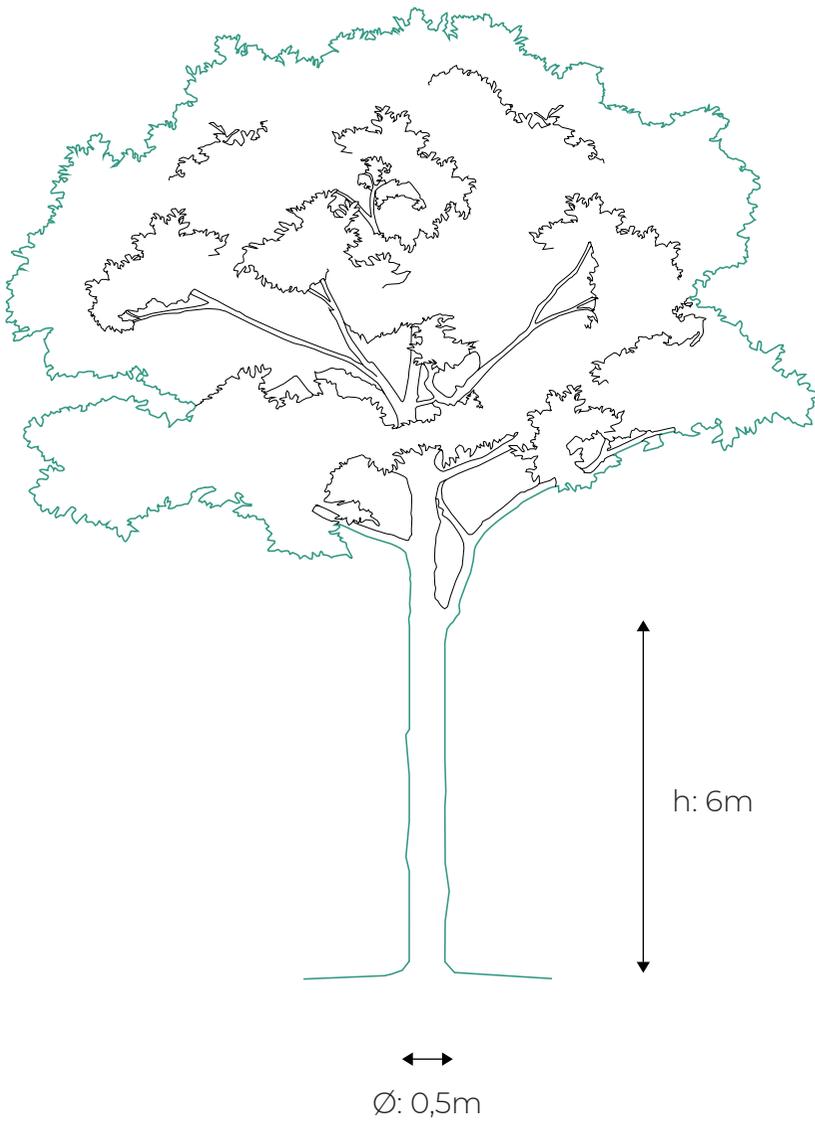
L'albero selezionato è un pioppo bianco selvatico, appartenente alla famiglia delle Salicaceae (specie molto diffusa in Italia).

I valori medi di altezza e diametro tronco sono stati utilizzati per definire i parametri dell'albero.

<sup>2</sup> Stefano Mancuso, *Plant Revolution*, Giunti Editore, 2017.

Albero selezionato: pioppo

Fig. 6



**Fig. 6** Disegno dell'albero scelto per le analisi con relative misure del tronco.. Elaborato personale.

## 8.6 I parametri di progetto

Dopo la prima fase progettuale, dove sono stati analizzati sito e profilo utenza, sono stati estrapolati i relativi parametri, questi ultimi sono catalogabili in quantitativi e qualitativi.

I parametri quantitativi sono computabili ed esprimibili numericamente o tramite rapporti matematici, la loro calcolabilità favorisce la rapida e corretta valutazione.

La larghezza minima dei percorsi di transito pedonale, i limiti dimensionali imposti dal bando di concorso e le dimensioni del tronco dell'albero sono perfettamente esprimibili matematicamente e associabili a strumenti di modellazione parametrica.

Gli input numerici possono essere espressi come valori fissi oppure esplicitati come rapporto numerico o formula matematica.

I parametri qualitativi invece sono a discrezione del progettista; è quest'ultimo infatti a definire la gerarchia di priorità del progetto, ed è colui che seleziona le numerose alternative proposte dagli algoritmi genetici dei solver del Generative Design.

Il comfort estetico e funzionale e i parametri di sicurezza sono definiti dal progettista ed è colui che seleziona e definisce il progetto.

Fig. 7

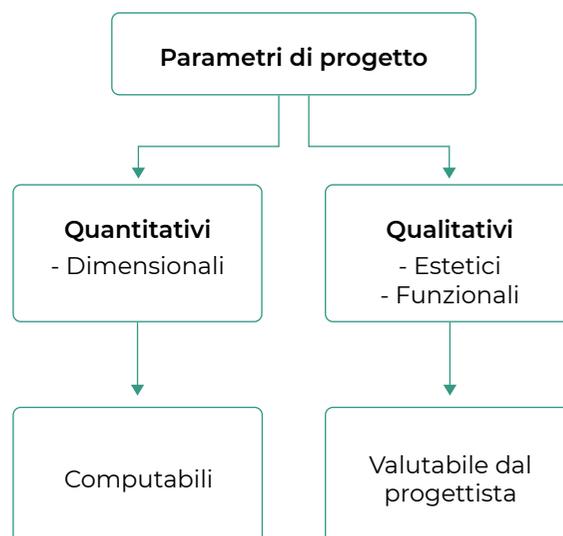


Fig. 7 Schema raffigurante i tipi di parametri progettuali. Elaborato personale.

La tabella riassuntiva sottostante raccoglie i principali parametri di progetto utilizzati e inseriti nel modello parametrico realizzato con Grasshopper. I parametri sono stati ricavati dall'analisi del profilo utenza e della preesistenza arborea.

Fig. 8

Albero		
<b>Parametri quantitativi</b>	Diametro tronco	0,5 m
	Altezza tronco	6 m
<b>Parametri qualitativi</b>	Limitazione invasività per l'albero	

Utenza		
<b>Parametri quantitativi</b>	Altezza utile	> 1,8 m
	Area utile	> 12 m <sup>2</sup>
	Larghezza sedute	> 0,35 m
	Larghezza accesso	> 1,2 m
	Larghezza percorsi	> 1,2 m
	Pendenza rampa	< 8 %
<b>Parametri qualitativi</b>	Sicurezza, comodità, comfort estetico e visivo	

Fig. 8 Schema raffigurante i tipi di parametri in riferimento all'albero e l'utenza. Elaborato personale.

## 8.7 Tassellatura di Voronoi

Se si osserva un tessuto epiteliale oppure la struttura aggregativa delle bolle di sapone notiamo che queste distribuzioni presenti in natura, apparentemente casuali, fanno riferimento ad un'unica logica geometrica dimostrabile attraverso la tassellazione Voronoi.<sup>3</sup>

Il termine tassellazione o tassellatura deriva dalla parola latina tassella, un frammento di pietra per creare i mosaici, definisce la suddivisione di uno spazio euclideo sia bidimensionale che tridimensionale come partizione dello spazio in regioni non sovrapposte oppure come un insieme di regioni che coprono lo spazio senza lasciare divari.<sup>4-5</sup>

Lo studio della tassellazione di Dirichlet, meglio nota come diagramma di Voronoi, ha un'ampia gamma di applicazione in matematica, biologia, cristallografia, astronomia, cartografia, computer grafica, chimica, urbanistica e architettura.

La sua applicazione in campo architettonico è visibile in diversi progetti contemporanei accomunati dall'estetica geometrico-matematica per esprimere un design ispirato alle aggregazione casuali naturali come per esempio gli involucri del **National Swimming Centre** a Pechino di PTW Architects o dell'**Ospedale Manuel Gea Gonzales** a Città del Messico, progettato dallo studio tedesco Elegant Embellishments.<sup>6</sup>

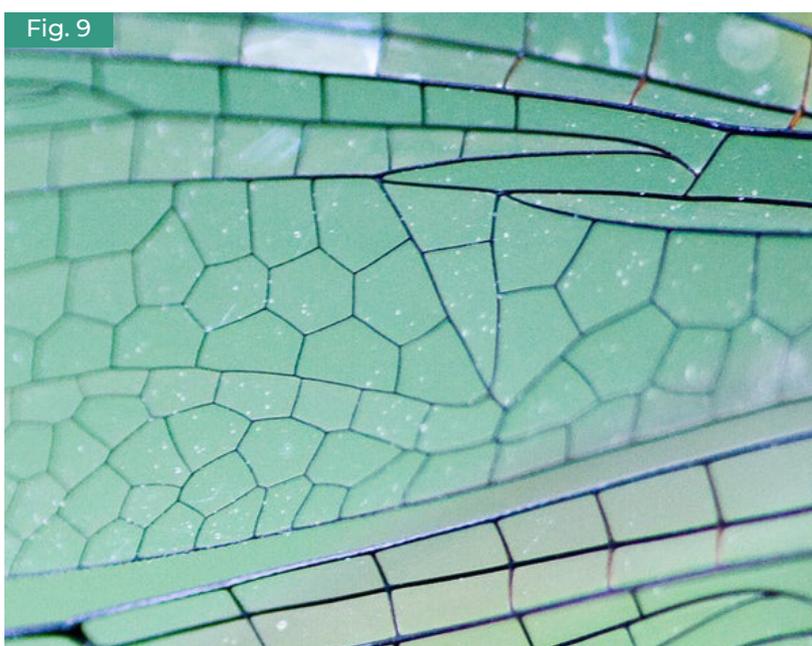
<sup>3</sup> Leonardo Baglioni, *La discretizzazione delle superfici continue*, tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo, Università degli Studi di Roma La Sapienza, a.a. 2005-2006, rel. Prof. ssa Laura De Carlo, Prof. Riccardo Migliari.

<sup>4</sup> Branko Grünbaum, Geoffrey Colin Shephard, *Tilings and Patterns*, New York: W.H. Freeman & Co. Ltd, 1986.

<sup>5</sup> Atsuyuki Okabe, Barry Boots, Kokichi Sugihara, Sung Nok Chiu, *Spatial Tessellations. Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*, New York: Wiley and Sons, 1992, pp. 532.

<sup>6</sup> PTW Architects <https://www.ptw.com>, (consultato Marzo 2021).

**Fig.9** Dettaglio dell'ala di una libellula la cui struttura è descrivibile attraverso la tassellatura di Voronoi. In <https://www.scientificamerican.com>.



Molti architetti e designer hanno da sempre tratto ispirazione estetica e funzionale dalla natura e grazie all'introduzione di strumenti di modellazione avanzata è stata resa accessibile l'esplorazione di nuove forme bio-ispirate che scompongono e riproducono la logica morfogenetica dei fenomeni naturali.

I diagrammi di Voronoi sono uno strumento di progettazione parametrica utilizzato spesso nella pianificazione spaziale e urbana negli ultimi anni.<sup>7</sup>

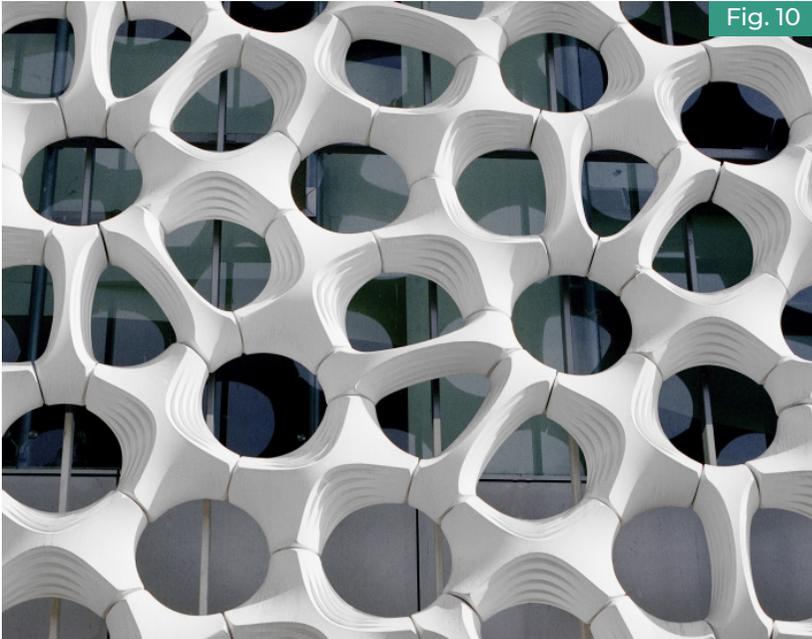


Fig. 10



Fig. 11

<sup>7</sup> Ali Şahin<sup>1</sup>, Betül Hatipoğlu Şahin (a cura di), *Examining the use of Voronoi diagrams in architecture on a student project*, atti della Terza conferenza internazionale sulle nuove tendenze in architettura e design d'interni, 28-30 Aprile 2017, Helsinki, Finlandia.

**Fig. 10** Foto dell'involucro dell'ospedale Manuel Gea Gonzales. <http://www.iaacblog.com>.

**Fig. 11** National Swimming Centre. In <https://www.detail.de>.

Secondo Franz Aurenhammer professore presso l'Università tecnica di Graz:

<sup>8</sup> Franz Aurenhammer, *Voronoi diagrams, a survey of a fundamental geometric data structure* in «ACM Computing Surveys», vol. 23, 1991, pp. 345-405.

<sup>9</sup> Eva Friedrich, *The Voronoi Diagram in Structural Optimization*, tesi magistrale in Science in Adaptive Architecture e Computation, Bartlett School of Graduate Studies, University College London, 2008.

<sup>10</sup> Marjorie Senechal, *Tassellazioni spaziali: concetti e applicazioni dei diagrammi di Voronoi* in «Science», vol. 260, 1993.

<sup>11</sup> Franz Aurenhammer, Rolf Klein, *Voronoi Diagrams* in Jörg-Rüdiger Sack, Jorge Urrutia (a cura di), *Handbook of Computational Geometry*, Elsevier, 2000.

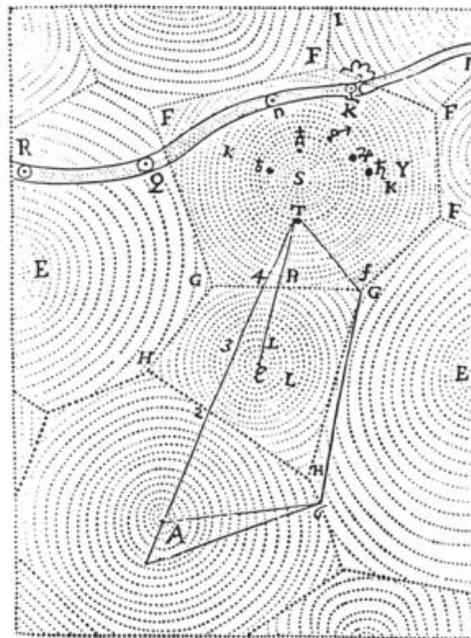
**Fig. 12** Disegno del sistema solare realizzato da Cartesio nel 1644, S rappresenta il Sole in James Dean Palmer, *Higher Order Voronoi Diagrams and Distance Functions in Art and Visualization*, Marina L. Gavrilova (a cura di), *Generalized Voronoi Diagram: A Geometry-Based Approach to Computational Intelligence*, 2008, p. 268.

«La tassellazione di Voronoi è una delle strutture fondamentali per la geometria computazionale».<sup>8</sup>

I diagrammi di Voronoi creano una struttura modulare unica e possono essere utilizzati per discretizzare anche le geometrie complesse.

La prima apparizione di una suddivisione spaziale Voronoi è attribuibile al filosofo e matematico francese **René Descartes**, noto come Cartesio, che nel 1644 illustra una scomposizione dello spazio in regioni poligonali convesse, porzioni di cielo dove sono collocate centralmente le stelle.<sup>9-10-11</sup>

**Fig. 12**



La decomposizione Voronoi è anche nota come tassellatura di **Lejeune Dirichlet** dal nome del primo matematico che, nel 1850, adottò questa metodologia di discretizzazione nel suo studio sulle forme quadratiche. L'evento che fa comprendere l'utilità di questa suddivisione spaziale è la sua adozione nell'indagine condotta da **John Snow** durante l'epidemia di colera che stava colpendo Londra nel 1854.

Il medico inglese riteneva che tra i vettori della malattia ci fosse l'acqua contaminata, indagando sul quartiere di Soho, uno tra i più colpiti dall'epidemia, realizzò una mappa identificando le aree di competenza delle pompe d'acqua individuando così una correlazione tra un elevato tasso di mortalità e la vicinanza con la pompa di Broad Street.

L'uso del diagramma di Voronoi segna la collaborazione tra la matematica e l'epidemiologia.<sup>12</sup>

Fig. 13



<sup>12</sup> Catherine Smith, Steven Le Comber, Hannah Fry, Matthew Bull, Steve Leach, *Spatial methods for infectious disease outbreak investigations: Systematic literature review* in «Eurosurveillance», vol. 20, 2015, pp. 1-3.

**Fig. 13** Mappa realizzata da John Snow. Ogni barra rappresenta un decesso. La curva segna punti a uguale distanza dalla pompa di Broad Street e da un'altra pompa. In <https://plus.maths.org>

Il nome Voronoi è invece in onore del matematico russo **Georgy Voronoi** che approfondì gli studi di Dirichlet per la sua tesi di dottorato nel 1908.

Da quel momento i diagrammi di Voronoi sono stati utilizzati dagli antropologi per descrivere le regioni di influenza di diverse culture, da cristallografi per spiegare la struttura di cristalli e metalli, da biologi per studiare le aree di competenza delle specie vegetali e dagli economisti per modellare i mercati economici.

La tassellazione serve anche per spiegare i modelli geometrici, morfogenetici e aggregativi dei tessuti cellulari vegetali e animali utilizzati per le simulazioni informatiche in ambito di ricerca biologica.<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Joost van Opheusden, Jaap Molenaar, *Algorithm for a particle-based growth model for plant tissues* in «Royal Society Open Science», vol. 5, 2018.

Come già accennato la tassellazione Voronoi è una partizione dello spazio che consiste nella sua divisione in regioni basate sulla distribuzione di un insieme di punti chiamati siti, nuclei, sorgenti o generatori.

Le regioni, chiamate regioni di Dirichlet, poligoni di Thiessen o poligoni di Voronoi, sono poligoni convessi che riempiono lo spazio senza sovrapporsi con gli altri, ognuno di essi contiene esattamente un punto sorgente. Un qualsiasi elemento geometrico all'interno di uno dei poligoni, è più vicino al relativo punto sorgente rispetto agli altri.<sup>14</sup> Con 2 punti generatori si può costruire il diagramma che definisce e divide lo spazio in 2 porzioni.

Fig. 14



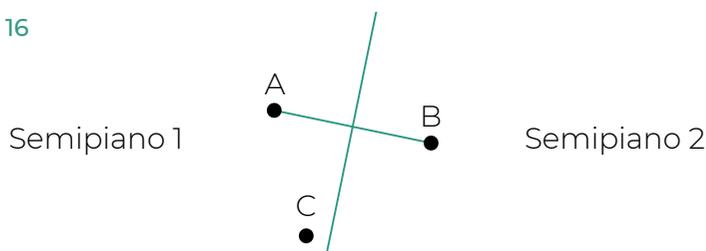
Occorre unire i 2 punti con un segmento e individuare il suo punto medio. La retta perpendicolare al segmento divide così il piano in 2 semipiani.

Fig. 15



Questa rappresentazione ha una notevole utilità in quanto aiuta ad identificare immediatamente l'area di competenza di ciascun seme, per esempio il punto C è collocato nel semipiano 1 ciò significa che è più vicino al seme A rispetto che al seme B.

Fig. 16

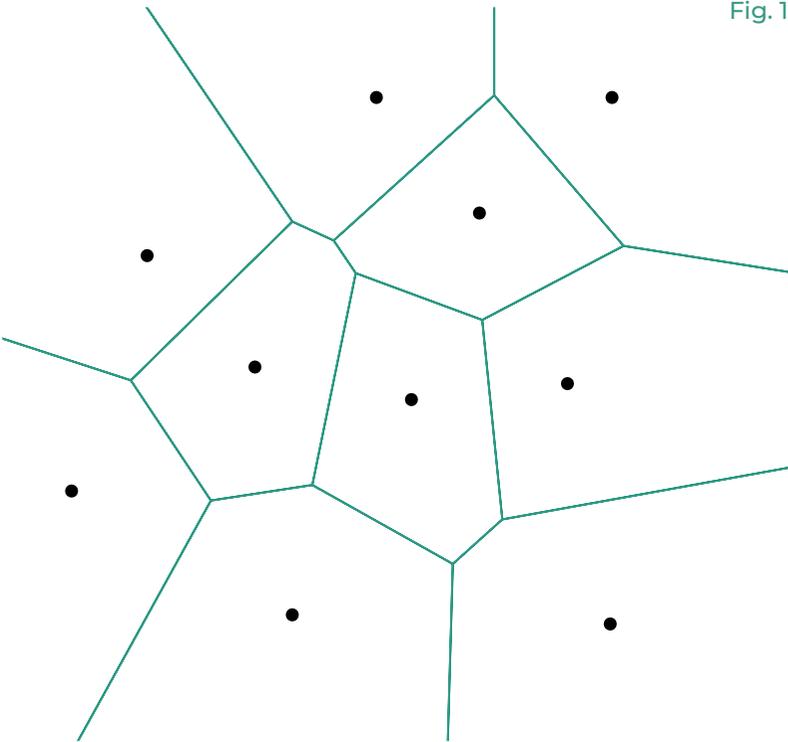


All'aumentare dei punti cresce anche il numero di partizioni, i poligoni delimitati sono definiti celle di Voronoi.

<sup>14</sup> Edward Bormashenko, Mark Frenkel, Alla Vilik, Irina Legchenkova, Alexander Fedorets, Nurken Aktaev, Leonid Dombrovsky, Michael Nosonovsky, *Caratterizzazione di modelli 2D autoassemblati con entropia di Voronoi* in «Entropy», vol. 20, 2018.

Fig. 14-15-16 Elaborato personale tratto dai disegni contenuti nell'articolo Martin Bock, Amit Kumar Tyagi, Jan-Ulrich Kreft, Wolfgang Alt, *Generalized Voronoi Tessellation as a Model of Two-dimensional Cell Tissue Dynamics* in «Bulletin of Mathematical Biology», vol. 72, 2010, pp. 1696-1731.

Fig. 17



In matematica il grafo duale planare di una tassellazione Voronoi corrisponde alla triangolazione di Delaunay, più semplicemente i siti Voronoi si possono unire per generare un reticolo come nella figura sottostante.

Fig. 18

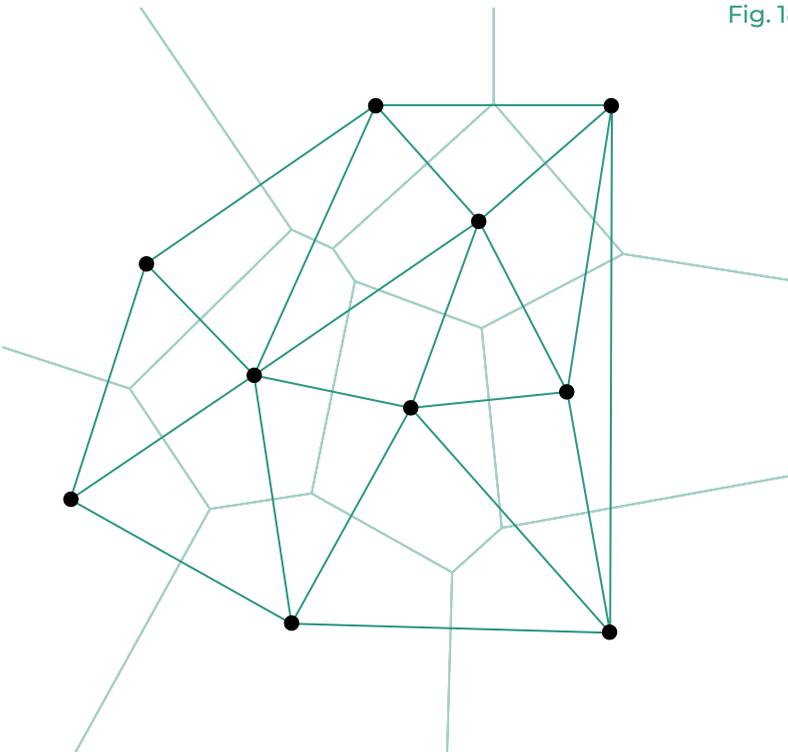


Fig. 17 Diagramma di Voronoi.  
Elaborato personale.

Fig. 18 Sovrapposizione tra diagramma di Voronoi e triangolazione di Delaunay.  
Elaborato personale.

## Nuove prospettive di utilizzo: Voronoi, GIS e algoritmi genetici

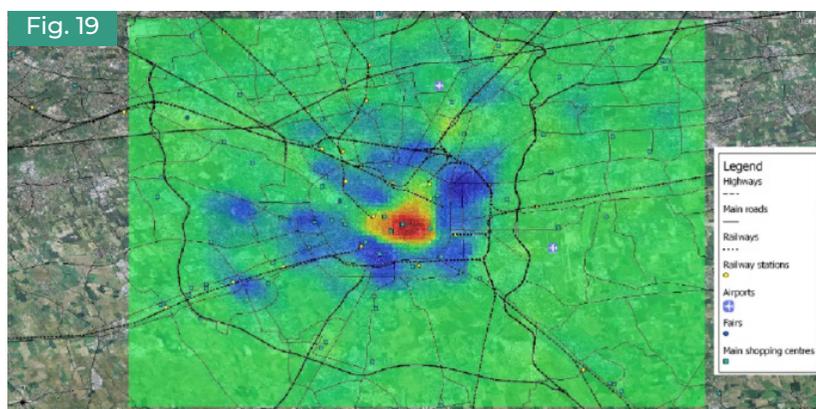
La tassellatura è un importante strumento di indagine sulle relazioni spaziali e per questo sono nate una gamma di tecniche che mirano a creare rappresentazioni informate dello spazio geografico. La stretta relazione tra spazio e tassellatura di Voronoi porta innovativi e inaspettati suoi utilizzi con notevoli prospettive per il futuro.

Nel libro "Advances in complex data modeling and computational methods in statistics", curato da Anna Maria Paganoni e Piercesare Secchi, gli autori riportano che analizzando la mobilità individuale e facendo uso di diagrammi Voronoi si riesce a tracciare l'utilizzo delle aree di una città per fasce orarie dimostrando che questa metodologia ha un grosso potenziale in ambito di pianificazione urbana.

Questa tecnica, volta alla gestione e all'analisi statistica di dati complessi come quelli provenienti dalle reti di telecomunicazioni mobili, ha lo scopo di indagare l'uso delle aree urbane.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Fabio Manfredini, Paola Pucci, Piercesare Secchi, Paolo Tagliolato, Simone Vantini, Valeria Vitelli, *Treelet Decomposition of Mobile Phone Data for Deriving City Usage and Mobility Pattern in the Milan Urban Region* in Anna Maria Paganoni, Piercesare Secchi (a cura di), *Advances in Complex Data Modeling and Computational Methods in Statistics*, Springer International Publishing, 2015.

**Fig. 19** Concentrazione delle attività durante le serate dei giorni lavorativi e durante il giorno (dalle 8.00 alle 20.00) del week end: quartieri residenziali della Milano regione urbana in *Treelet Decomposition of Mobile Phone Data for Deriving City Usage and Mobility Pattern in the Milan Urban Region*



<sup>16</sup> Diego Rosa Mota, Marise Takano, Pastor Willy Gonzales Taco, *Un metodo che utilizza i diagrammi Voronoi integrati GIS per l'identificazione della stazione ferroviaria dei pendolari: un caso di studio da Brasilia* in «Procedia», vol. 162, 2014, pp. 477-486.

Queste interessanti prospettive hanno applicazioni in numerose indagini come quella realizzata dall'università di Brasilia per la medesima città, condotta per identificare la posizione più adatta dove collocare nuove stazioni ferroviarie, integrando GIS, pianificazione e tassellatura di Dirichlet.<sup>16</sup>

Ampio uso anche in ambito aerospaziale attraverso l'uso combinato di applicativi informatici e algoritmi genetici in grado di generare diagrammi Voronoi dinamici per modernizzare la gestione del traffico aereo ottimizzando le crescenti e mutevoli richieste di operazioni di volo.

Con il nome di Dynamic Airspace Configuration (DAC) si identifica una configurazione dinamica dello spazio aereo per fornire la massima flessibilità in risposta alle instabili condizioni meteorologiche e di traffico.

Adattare automaticamente le configurazioni dello spazio aereo in base all'evoluzione del traffico suddividendo lo spazio aereo in aree di competenza che si uniscono o separano a seconda delle esigenze. La metodologia è stata testata con successo, gli algoritmi genetici multi-obiettivo hanno risolto i problemi di ottimizzazione spaziale attraverso calcoli iterativi.<sup>17-18</sup>

Risultati sperimentali dimostrano la grande versatilità applicativa di questo metodo di partizione spaziale per scoprire il punto vicino ad un punto dato, senza necessariamente calcolare la distanza. La gestione della tassellatura tramite strumenti informatici o algoritmi genetici ne accresce il suo potenziale.

<sup>17</sup> Min Xue, *Airspace Sector Redesign Based on Voronoi Diagrams*, December in «Journal of Aerospace Computing Information and Communication», vol. 6, 2009.

<sup>18</sup> Marina Sergeeva, Daniel Delahaye, Catherine Mancel, Andrija Vidosavljevic, *Dynamic airspace configuration by genetic algorithm* in «Journal of Traffic and Transportation Engineering», vol. 4, Giugno 2017, pp. 300-314.

# 09

## Processo computazionale e generativo del padiglione

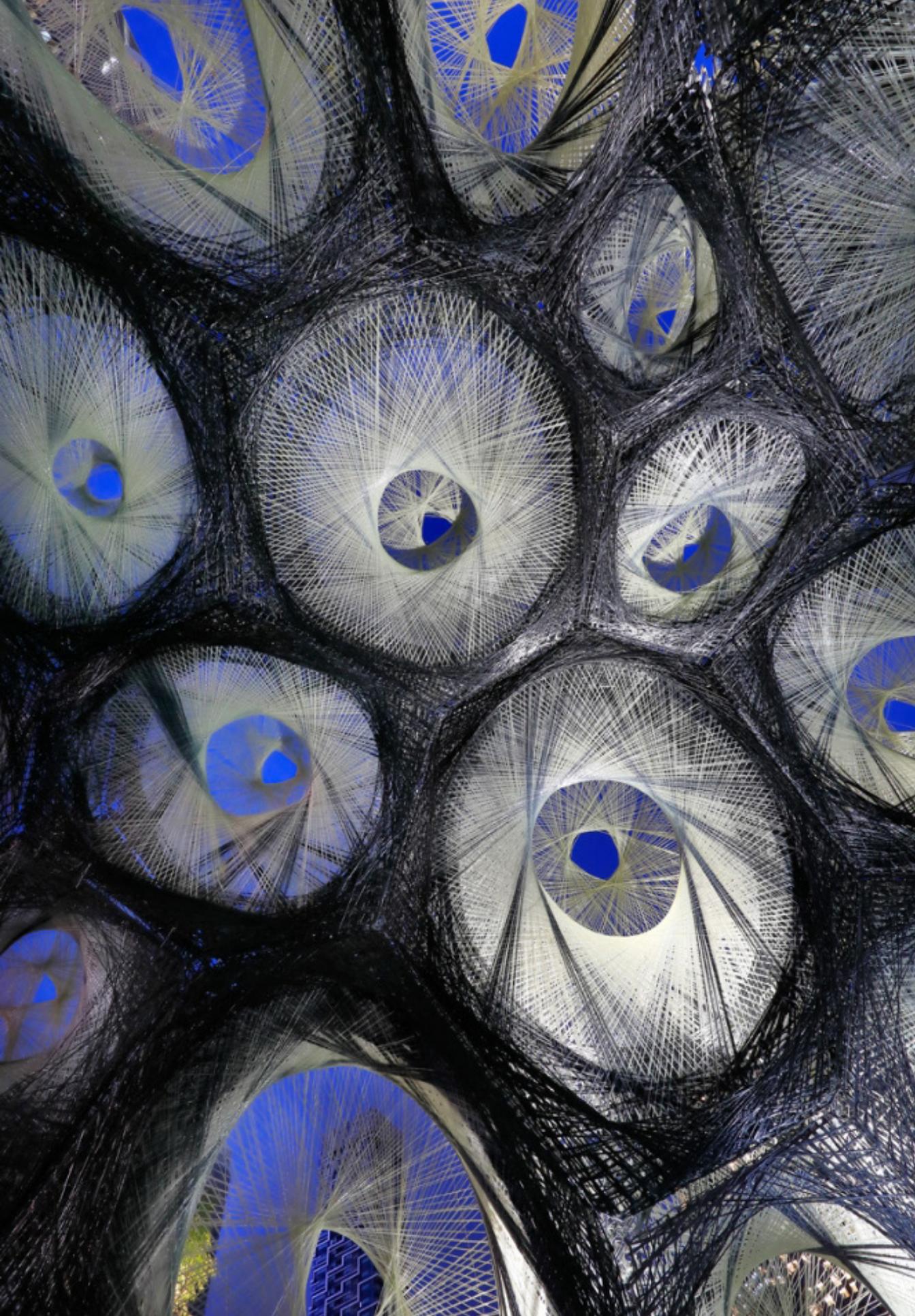
di  
Mohamed Yasser Hariss

Nel seguente capitolo viene illustrato il processo computazionale che ha portato alla generazione della forma. Attraverso l'uso di specifici componenti sequenziali, presenti all'interno del plugin di Grasshopper per Rhinoceros, è possibile sviluppare una o più geometrie applicando specifiche strategie computazionali.

I componenti utilizzati sono stati raggruppati per mostrare i passaggi che hanno portato alla risoluzione di uno specifico compito mentre i parametri quantitativi sono stati successivamente usati come input per l'ottimizzazione della forma attraverso il solver di Wallacei.

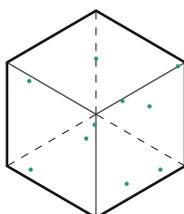
La geometria finale rappresenta una delle possibili configurazioni formali dettate dai parametri e dai requisiti descritti nel capitolo precedente.

Fotografia dell'ICD/ITKE Research Pavilion 2013/14 presso l'Università di Stoccarda, Institute for Computational Design and Construction, foto di Bai Yu. In <https://www.icd.uni-stuttgart.de>.



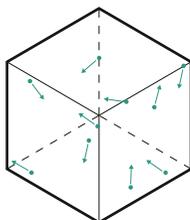
## 9.1 Schema riassuntivo

La geometria di progetto è stata sviluppata attraverso la definizione di uno script su Grasshopper determinando i parametri e i vincoli base, da utilizzare in una fase successiva per l'individuazione della forma ottimale tramite il solver generativo di Wallacei. Nel seguente schema viene riportato in modo schematico il processo descrivendo sinteticamente i vari passaggi. In seguito verranno esposti in modo dettagliato i passaggi accompagnando le descrizioni con schemi e catture dello script.



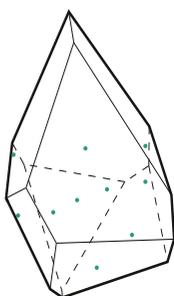
### 1. Generazione punti

La generazione dei punti avviene all'interno di un box avente 20 metri quadrati di superficie rispettando i limiti imposti dal bando di concorso dello Spazio Thetis.



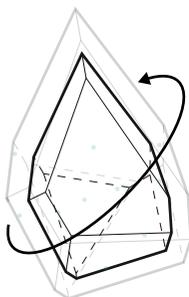
### 2. Movimento punti

È stato applicato il movimento dei punti gestibili dal solver per ottimizzare le soluzioni attraverso l'algoritmo genetico NSGA-II.



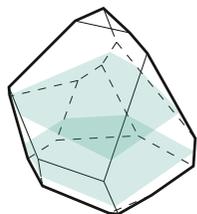
### 3. Sviluppo geometria

Con il comando Facet Dome si è individuata la forma non ancora ottimizzata dal solver. Il comando utilizza i punti generati precedentemente per creare dei piani che intersecandosi formano una geometria chiusa.



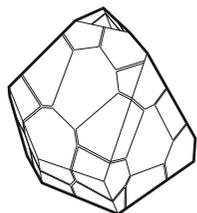
### 4. Rotazione e scala volume

La rotazione, come il movimento dei punti, servirà per gestire l'orientamento ottimizzando gli obiettivi imposti al solver. Il volume è stato poi scalato per riportarlo all'interno della superficie imposta di 20 metri quadrati.



### 5. Rettifica volume

Il volume è stato rettificato per permettere il passaggio dell'albero al suo interno individuando la superficie utile di calpestio.



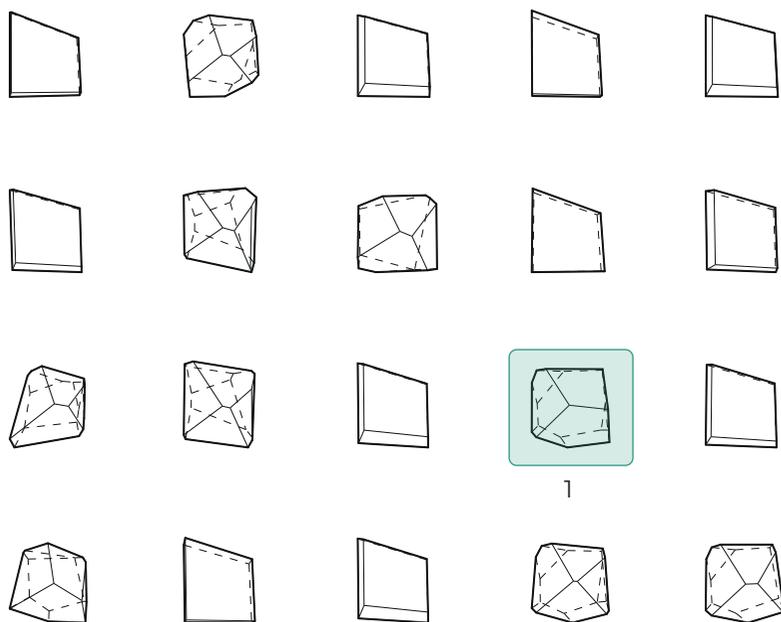
### 6. Involucro Voronoi

Ottenuta la geometria finale si è proceduto definendo un involucro con un pattern Voronoi tridimensionale per dare continuità fra le diverse facciate.

Lo script per la generazione della forma è stato utilizzato, insieme agli obiettivi dimensionali del progetto, per generare una moltitudine di soluzioni con Wallacei. Analizzando e selezionando le soluzioni ritenute ottimali dal solver, è stato possibile scegliere la geometria finale di progetto in base al confronto dei risultati ottenuti e ad un gusto personale estetico e funzionale.

Generazione 99

Fig. 1



<b>Fitness 1</b> (Lati corti)	<b>Fitness 2</b> (Area utile)	<b>Fitness 3</b> (Altezza)	<b>Fitness 4</b> (Distanza centro)
----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	---------------------------------------

1	2	13,23 mq	6,04 m	0,19 m
---	---	----------	--------	--------

Fig. 1 Soluzioni ottimizzate dal solver nella generazione 99 e relativa selezione della geometria di progetto rispetto agli obiettivi (fitness). Elaborato personale.

## 9.2 Introduzione ai concetti base della gestione dati di Grasshopper

La logica con la quale è stato sviluppato il processo computazionale della creazione della geometria di progetto tiene in considerazione molteplici fattori, riassumibili in tre categorie. La prima include quelli che sono i vincoli e linee guida indicati nel bando di concorso promosso dallo Spazio Thetis. La seconda fa riferimento ad una visione di quello che può essere l'aspetto finale del volume attraverso un concept di progetto; questa fase, essendo ancora preliminare, definisce le basi formali senza porre ancora tutti i vincoli che condizionerebbero inevitabilmente l'aspetto finale della geometria. L'ultima, invece, riguarda il processo generativo grazie al quale è possibile definire una serie di obiettivi per poi essere elaborati al fine di ottenere una geometria ottimizzata secondo i criteri precedentemente esposti.

Queste tre realtà non lavorano in modo indipendente, ma cooperano insieme alla definizione dello script attraverso il plugin di Grasshopper per Rhinoceros. La forma si sviluppa con il susseguirsi di comandi, chiamati componenti, ai quali vengono imposti degli input specifici.

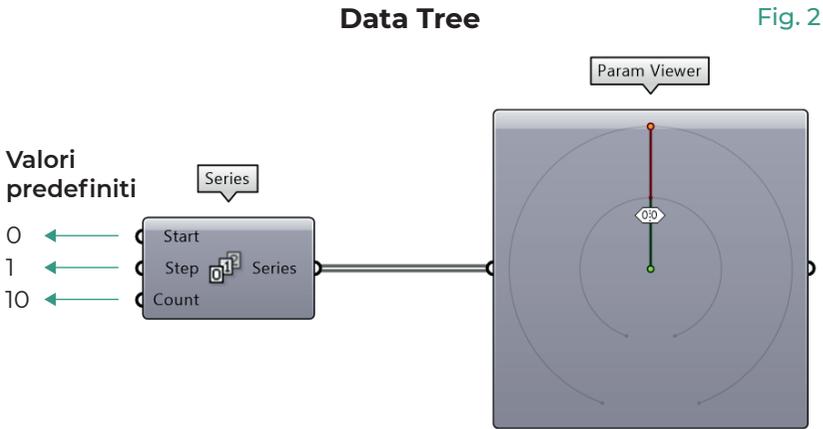
È opportuno menzionare il fatto che a parità di risultato è possibile operare in maniera differente, pertanto il procedimento da noi svolto non è inteso a definire quale sia il miglior approccio alla risoluzione di un problema ma quale sia una delle possibili soluzioni al problema.

### Data Tree

Come è stato visto e trattato in precedenza, Grasshopper è uno strumento molto utile per la gestione di geometrie complesse attraverso l'esplicitazione di comandi che svolgono specifici compiti, semplificando il processo di creazione della forma. Esistono centinaia di componenti, da quelli più semplici a quelli più complessi, ma il principio di funzionamento di come vengono gestiti i dati al loro interno è uguale per tutti. La struttura che sta alla base dell'organizzazione delle informazioni è chiamata Data Tree.

Il Data Tree, o albero dei dati, è un modello informatico di classificazione dei dati organizzato in una struttura gerarchica ad albero. Questo "albero" prende forma

appena viene creato un componente e si articola in maniera più complessa man mano che vengono collegati altri componenti. Si ha quindi un dato di partenza dal quale si sviluppano le successive diramazioni disposte lungo un anello che ne identifica il percorso. Collegando l'output di qualsiasi componente con il comando **Param Viewer** e facendo doppio click sul componente, è possibile visualizzare la struttura ad albero.



## Liste

Le informazioni presenti in ogni singolo ramo sono racchiuse in liste o liste di liste che si articolano a seconda di come un componente restituisce questi dati, oppure attraverso specifiche azioni svolte dall'utente.

La comprensione delle liste è un aspetto fondamentale, inizialmente spesso trascurato, che se non appreso porta a riscontrare problemi nell'utilizzo di diversi componenti. Spesso Grasshopper gestisce i dati autonomamente non necessitando dell'intervento dell'utente.

Maggiore è la complessità dello script, maggiore è la possibilità di dover gestire l'organizzazione dei dati manualmente.

Le liste possiedono tre informazioni al loro interno: il **branch** (ramo), l'**index** (indice) e l'**item** (elemento). Il branch indica la posizione della lista all'interno del Data Tree ed è rappresentato da una serie di numeri, separati da una virgola, ad indicare il ramo di appartenenza. L'index è un valore numerico associato ad un item specifico e parte sempre da 0. Non è possibile avere più di un item attribuito ad un index, pertanto, in una lista contenente

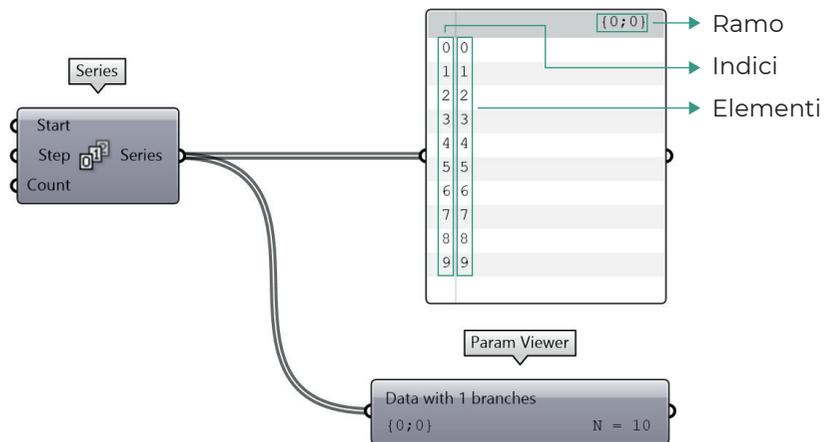
**Param Viewer:** mostra la strutturazione dei dati all'interno delle liste sotto forma di albero di dati.

**Fig. 2** Script sul Data Tree del componente Series.

10 elementi, l'ultimo index corrisponde al numero 9. Infine, l'item corrisponde all'output del componente e può rappresentare un valore di tipo numerico, testuale, booleano o geometrico.

Fig. 3

### Liste



### Reverse, Flatten, Graft, Simplify

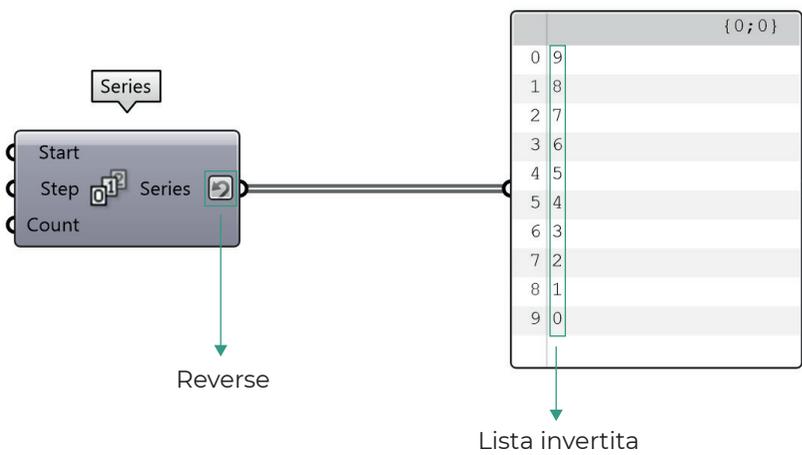
L'organizzazione dei dati presenti all'interno delle liste può essere gestita e personalizzata direttamente dall'utente attraverso l'uso di specifici componenti. Grasshopper ne mette a disposizione diversi per la selezione, partizione o eliminazione di dati contenuti al loro interno. Di default esistono quattro comandi specifici per la gestione dei dati, spesso presenti sia in input che in output nella maggior parte dei componenti, che sono: Reverse, Flatten, Graft e Simplify. Tramite click con il tasto destro del mouse su uno specifico input o output si aprirà un menu contestuale con i suddetti comandi.

Il Reverse, probabilmente il più semplice e intuitivo fra i quattro, riordina le informazioni di una lista invertendo l'ordine degli item. Il comando agisce solo a livello di dati, pertanto, in una lista di liste l'ordine con il quale sono disposte rimarrà lo stesso mentre gli item presenti al loro interno verranno invertiti. E' importante tenere presente che gli index non possono mai cambiare di posizione e l'item che prima stava alla fine della lista si troverà ora all'index 0.

Fig. 3 Script sulle parti che compongono una lista.

## Reverse

Fig. 4



Il Flatten, a differenza degli altri, è l'unico comando che elimina definitivamente qualsiasi tipo di informazione organizzativa presente all'interno del Data Tree. La complessità dell'albero si riduce ad un unico ramo con percorso {0} corrispondente ad una sola lista, dove al suo interno sono localizzati tutti i dati. Se prima di utilizzare il Flatten erano presenti 5 liste con 2 item ognuna, ora le liste si riducono ad una contenente 10 item.

Spesso l'utilizzo del Flatten è sconsigliato proprio per la perdita di informazione relativa al Data Tree ma a volte risulta essere l'unico modo, o il più semplice, per risolvere uno specifico compito.

## Flatten

Fig. 5

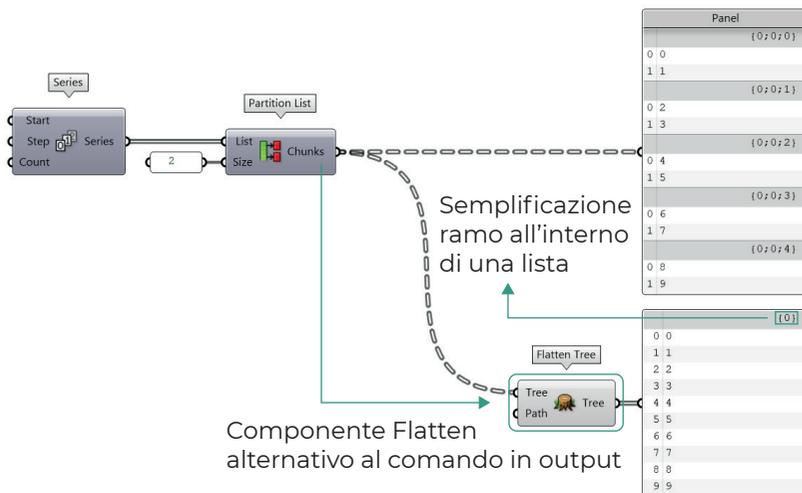


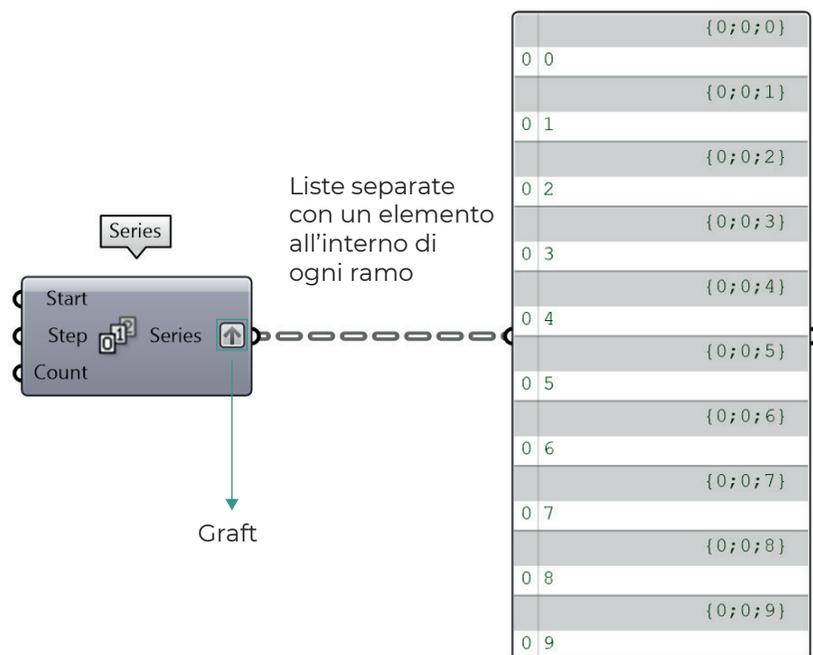
Fig. 4 Script sul funzionamento del Reverse.

Fig. 5 Script sul funzionamento del Flatten.

Il Graft aumenta la complessità dell'albero posizionando ogni item in un ramo differente. Viene a crearsi così una lista di liste con il numero di item pari al numero di liste.

Fig. 6

## Graft



Infine il Simplify semplifica il Data Tree al ramo più inferiore avente le stesse informazioni condivise tra diversi item. L'organizzazione delle liste rimane la stessa ma il percorso si riduce al ramo nel quale i dati possono essere confrontati. Se una lista possiede un solo item di partenza, non è possibile semplificarla fino ad arrivare al percorso { 0 } in quanto Grasshopper non riesce a verificare e confrontare l'origine del singolo dato.

La manipolazione dei dati può avvenire in molteplici maniere e le quattro tipologie sopra elencate sono quelle già proposte da Grasshopper. Nel corso della spiegazione dello script verranno utilizzati altri metodi di manipolazione dei dati accompagnati da approfondimenti e schemi.

Fig. 6 Script sul funzionamento del Graft.

# Simplify

Fig. 7

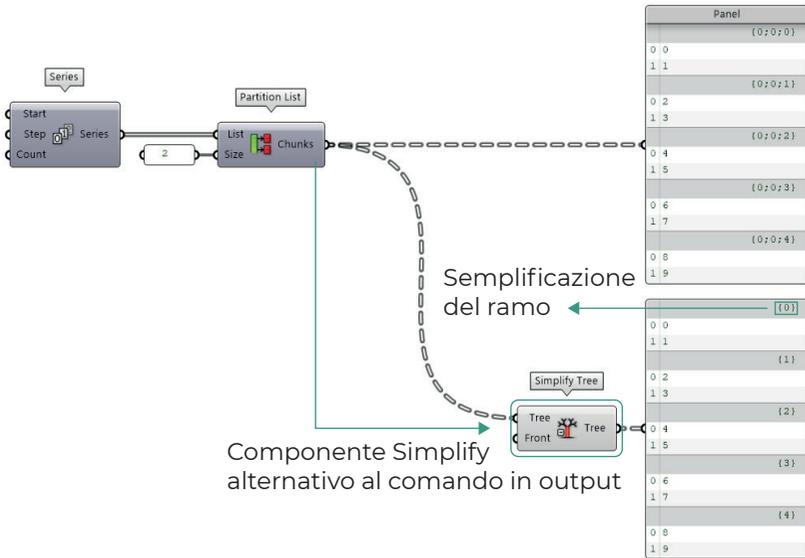


Fig. 7 Script sul funzionamento del Simplify.

## 9.3 Script geometria di progetto

Le unità di misura utilizzate sono in metri, inoltre, per questioni di semplicità e comprensibilità verranno esposti in maniera dettagliata i componenti ritenuti più importanti.

Fig. 8 Inputs geometria

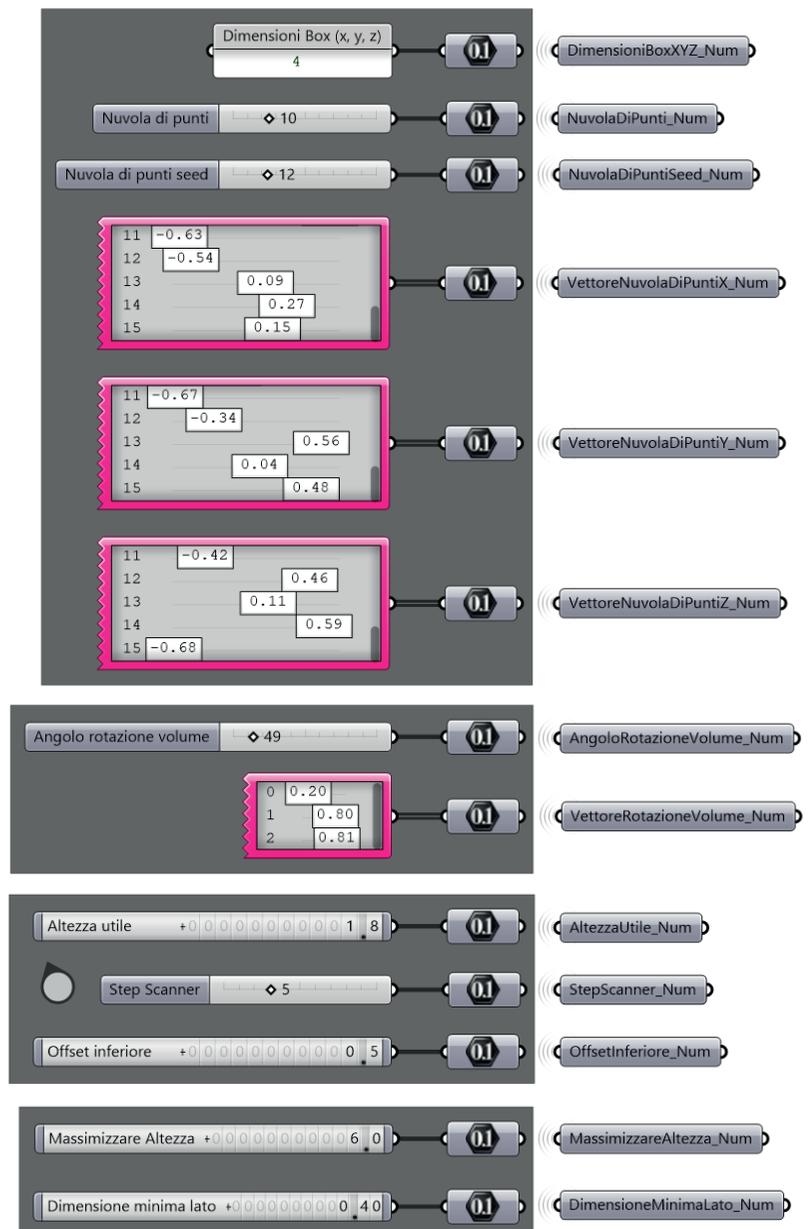
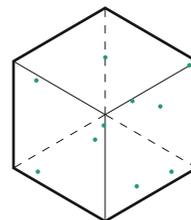


Fig. 8 Script sugli input per la creazione della geometria di progetto.

## 1. Generazione punti e vincoli spaziali

Partendo da un volume cubico di dimensioni 4x4x4, precedentemente dimensionato secondo le linee guida del bando di concorso, si inseriscono una serie di punti nello spazio posti in maniera casuale per generare diversità nella creazione della forma.



Per la creazione della forma, in riferimento alle scelte mostrate nel concept, si sono definiti i limiti spaziali entro il quale la geometria dovrà svilupparsi. Il bando pone a riguardo un impianto a terra utile massimo di 20 metri quadrati.

Volendo realizzare una forma "sfaccettata" con il comando **Facet Dome**, che analizzeremo poi in seguito, non risulta importante controllare inizialmente le dimensioni in quanto la geometria che verrà a formarsi tenderà spesso ad uscire dallo spazio di competenza, per poi essere scalato in una fase successiva.

Avendo come riferimento la superficie massima entro la quale costruire il modello, si è partiti realizzando un volume cubico attraverso il comando **Domain Box** impostando il dominio nella direzione degli assi x, y e z compreso fra 0 e 4 unità.

Il dominio non è altro che una serie di numeri entro due limiti scelti mentre l'unità di riferimento di Grasshopper corrisponde all'unità di misura attualmente in uso su Rhinoceros. Queste unità numeriche possono essere assegnate in input ai comandi tramite componenti specifici; il più comune è il **Number Slider**, una barra di comando a valore incrementale avente una serie di numeri posti entro due valori limite scelti. L'incremento può essere a semplici numeri interi (Integer) o decimali (Floating point), fino ad un massimo di sei valori dopo la virgola. Un altro input, spesso utilizzato per indicare valori fissi che non hanno necessità di variare, è il **Panel**, un componente nel quale è possibile inserire qualsiasi informazione di tipo testuale sotto forma di testo, numeri, valori booleani (vero o falso), espressioni o altro.

Successivamente sono state inserite, in modo arbitrario, una serie di punti nello spazio tridimensionale con il comando **Populate 3D** a cui è stato collegato un **Number Slider** in modo da scegliere la quantità di punti presenti. Il componente permette la modifica della casualità con la quale vengono generati i punti attraverso il **Seed**. Assegnandogli ogni volta un numero diverso, la posizione

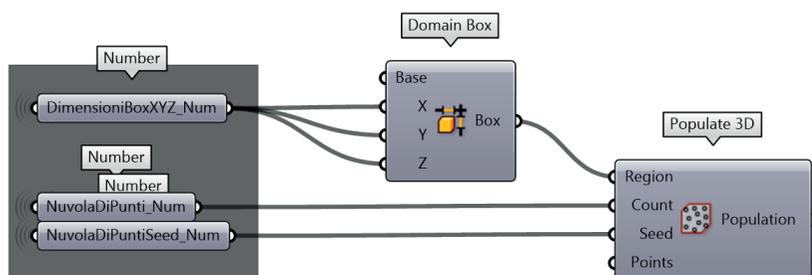
**Domain Box:** crea un box definendo l'origine e le dimensioni nelle 3 coordinate cartesiane.

**Populate 3D:** popola una geometria tridimensionale con una serie di punti disposti casualmente nello spazio.

spaziale dei punti cambierà sempre in maniera del tutto arbitraria.

La nuvola di punti ricavata individua una delle possibili soluzioni spaziali con la quale prenderà forma la geometria. Attraverso questo approccio è possibile generare una moltitudine di soluzioni non ordinarie che si ispirano alle forme articolate che sono presenti in natura. In questo modo è il processo a determinare la forma partendo da un'idea.

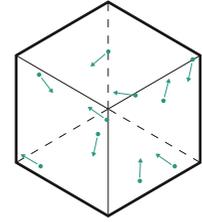
**Fig. 9** Generazione punti e vincoli spaziali



**Fig. 9** Script sulla generazione dei punti tramite il componente Populate 3D.

## 2. Movimento punti nello spazio

Ai punti viene data una limitata flessibilità di movimento nello spazio in modo da sopperire a eventuali imperfezioni geometriche in un'ottica di estetica e funzionalità.

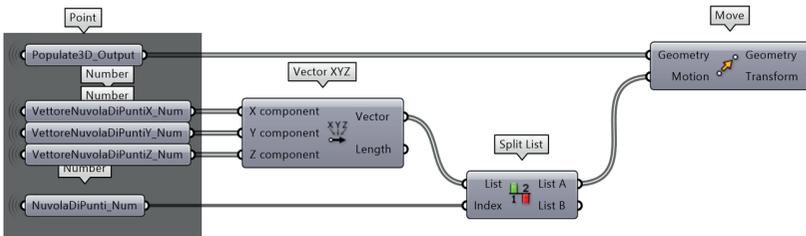


Non avendo pieno controllo sulla posizione che i punti assumono nello spazio, si è ritenuto opportuno apportare degli spostamenti mirati per ogni singolo punto verso una direzione anch'essa gestibile in modo aleatorio, impostando con il comando **Vector XYZ** una serie di valori all'interno di tre **Gene Pool** da associare ad ogni singola coordinata del vettore. I valori impostati hanno un range che parte da -1 fino ad 1 per dare ai punti la possibilità di muoversi in qualsiasi direzione per un massimo di 1 metro dall'origine. Infine, con il comando **Move** è possibile collegare sia i punti dall'output del comando Populate 3D che i vettori dal Vector XYZ per applicare loro lo spostamento.

Il movimento singolo dei punti sarà uno degli aspetti a condizionare maggiormente l'aspetto formale secondo un'analisi prestazionale del solver generativo di Wallacei.

Movimento punti nello spazio

Fig. 10



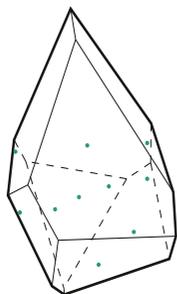
**Vector XYZ:** crea un vettore partendo dalle 3 coordinate cartesiane.

**Gene Pool:** contiene una serie di variabili.

**Move:** sposta una qualsiasi geometria lungo un vettore.

**Fig. 10** Script sul movimento dei punti nello spazio tramite il comando Move.

### 3. Facet Dome



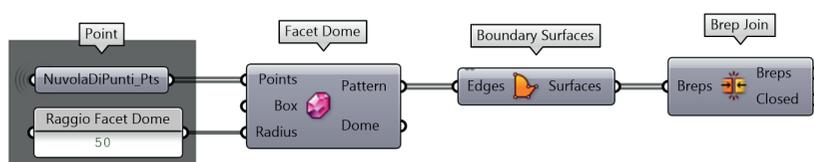
Tramite i punti presenti nello spazio tridimensionale, la geometria prende forma con il comando Facet Dome.

Impostati i parametri entro i quali i punti possono assumere diverse configurazioni spaziali, si è passati alla definizione della forma attraverso il componente **Facet Dome**. Questo comando prende in input una lista di punti per creare una geometria tassellata con un pattern Voronoi tridimensionale. La forma ottenuta dal Facet Dome varia significativamente in base al numero di punti, essa infatti tende ad assumere una forma a cupola maggiori sono i punti.

Ad ogni punto situato nel box viene assegnato un piano bidimensionale orientato secondo un preciso rapporto di prossimità che intercorre fra i punti. Da essi vengono a formarsi dei cerchi, partendo dal centro del piano, con raggio variabile, fino a quando le circonferenze toccandosi formano delle linee di separazione. E' opportuno impostare un raggio, all'interno dell'input del comando, con dimensioni elevate per coprire eventuali complessità spaziali dei punti che creerebbero delle geometrie aperte o incomplete.

Fig. 11

### Facet Dome

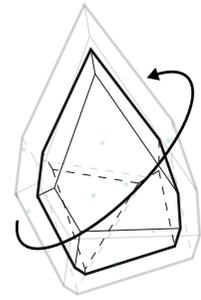


**Facet Dome:** crea una cupola sfaccettata in base al numero di punti in input.

**Fig. 11** Script sulla creazione della geometria tramite il componente Facet Dome.

## 4. Rotazione e ridimensionamento del volume

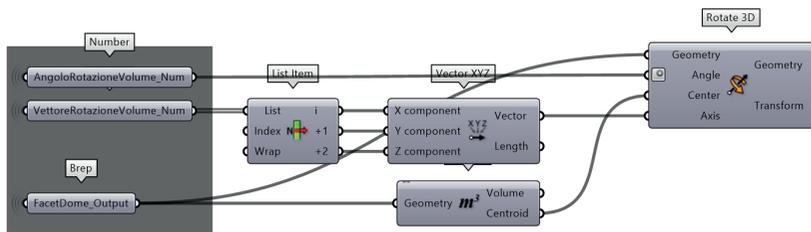
Applicando una rotazione della geometria, scalandola successivamente, aumentano le configurazioni possibili nel rispetto dei vincoli dimensionali imposti dal bando di concorso.



Ottenuta la forma di base, occorre definire il processo con il quale è possibile determinare la superficie di calpestio. Prima di arrivare però al calcolo dell'area utile si è proceduto ruotando la geometria con il comando **Rotate 3D**. Come per lo spostamento dei punti nello spazio, con il comando Vector XYZ è stato impostato un asse di rotazione arbitrario lungo il quale ruotare la geometria secondo un angolo che va da 0 a 360 gradi con un Number Slider.

Rotazione

Fig. 12



Partendo da una forma spigolosa, la rotazione modifica inevitabilmente le dimensioni del box, con le dimensioni minime, entro il quale la geometria è inclusa, identificabile su Grasshopper tramite il comando Bounding Box. Una volta individuato e scomposto nelle sue parti, viene selezionata una delle due facce parallele al piano di riferimento XY e calcolata la superficie con il comando Area.

Attraverso il calcolo inverso per il ridimensionamento del volume, inserito tramite comando **Expression**, si è ottenuto il fattore con il quale scalare la geometria per avere un impianto a terra del Bounding Box di 20 metri quadrati, definiti secondo il bando di concorso. Essendo il valore dell'area a crescita esponenziale rispetto al fattore di scala, quest'ultimo sarà uguale alla radice quadrata del rapporto fra l'area attuale e l'area target (20 metri quadrati). La forma è stata infine ridimensionata con il comando **Scale** impostando come punto di riferimento il baricentro ricavato tramite il comando Volume.

**Rotate 3D:** ruota una geometria lungo un asse.

**Fig. 12** Script sulla Rotazione del volume tramite il componente Rotate 3D.

**Expression:** utilizza formule matematiche per svolgere determinati compiti.

**Scale:** scala una geometria rispetto ad un punto impostando un fattore di scala.

La rotazione della geometria sarà anch'essa uno dei principali fattori a variare l'aspetto formale in riferimento agli obiettivi da ottimizzare con il solver evolutivo di Wallacei.

Fig. 13

## Scala

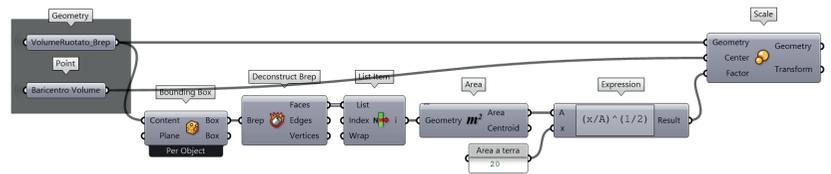
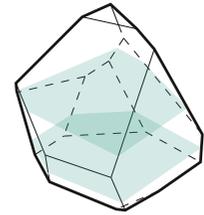


Fig. 13 Script sul ridimensionamento del volume tramite il componente Scale.

## 5. Superficie di calpestio e sottrazione del volume

Si procede con l'individuazione della superficie di calpestio per il calcolo dell'area utile e alla rettifica delle porzioni di volume che comportano un ostacolo con la preesistenza (suolo e albero).



Fino ad ora la forma generata attraverso lo script può assumere diverse configurazioni senza avere un preciso riferimento spaziale come succede invece nella realtà.

Non potendo utilizzare il piano XY come piano di riferimento, è stata presa la superficie inferiore del Bounding Box come piano di appartenenza dal quale sviluppare le successive modifiche formali.

Per individuare la superficie di calpestio con un'area ottimale, si è agito sulla traslazione della geometria lungo l'asse verticale con il comando Move. Il piano di riferimento, sempre fisso nella sua posizione originale, è stato copiato e spostato perpendicolarmente ad esso con il comando **Offset Surface** di una distanza pari a 1,8 metri per intersecare la geometria in due parti. La prima superficie verrà usata come piano di intersezione con la geometria per individuare il piano di calpestio mentre la seconda, intersecata con la logica della prima, verrà utilizzata come piano di analisi per calcolare l'area utile da utilizzare come obiettivo per Wallacei. La superficie di contatto con il volume è stata individuata con il comando **Brep | Brep**, il quale risolve l'intersezione fra diverse geometrie, identificabili su Rhinoceros con il nome di **Boundary representation**.

**Offset Surface:** crea una superficie identica a quella in input traslandola perpendicolarmente.

**Brep | Brep:** individua le curve e i punti di intersezione fra due Breps.

**Boundary representation:** forme composte da multiple superfici o superfici tagliate (cubo, piramide, superficie a forma circolare e altro).

### Superfici area utile

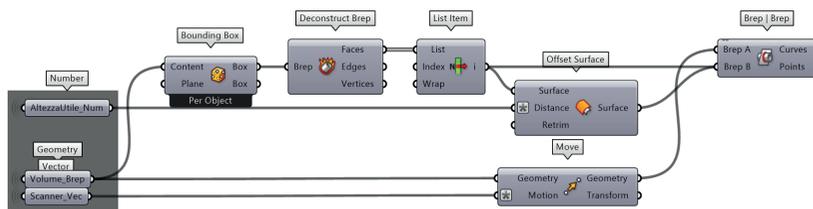


Fig. 14

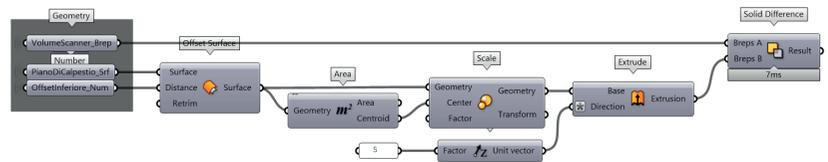
Infine con il piano di riferimento, corrispondente al lato inferiore del Bounding Box, si è copiata la superficie sempre con il comando Offset Surface di una distanza pari a 0,5 metri nella direzione negativa rispetto all'asse Z per poi applicarci un'estrusione nella medesima direzione con il comando **Extrude**. Il volume ottenuto

**Fig. 14** Script sull'individuazione della superficie di calpestio tramite il comando Brep | Brep.

**Extrude:** estrude superfici e curve lungo un vettore.

(Breps B) è stato poi utilizzato come solido di sottrazione alla geometria del Facet Dome (Breps A) attraverso il componente **Solid Difference**. Con quest'ultimo passaggio l'intento è quello di rimuovere la porzione di geometria inferiore, che altrimenti andrebbe a contatto con il suolo, elevandola da terra.

Fig. 15 **Sottrazione volume**



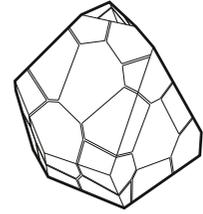
La stessa logica è stata applicata nel punto estremo del volume per permettere all'albero di passare attraverso.

**Solid Difference:**  
esegue una sottrazione  
fra due solidi.

**Fig. 15** Script sulla  
sottrazione del volume  
tramite il comando  
Solid Difference.

## 6. Involucro Voronoi

Ottenuta la geometria dal processo computazionale precedentemente descritto, si procede con la pannellizzazione delle pareti con un pattern Voronoi.



Dopo aver identificato una forma fittizia, la quale verrà successivamente ottimizzata attraverso il solver evolutivo, si passa a definire la tassellatura da applicare alle facciate. Per dare un senso di continuità geometrica sulla pelle, attraverso l'utilizzo di un pattern Voronoi, è opportuno definire preventivamente quali saranno i punti generatori dei pannelli tenendo in considerazione alcuni accorgimenti:

1. In corrispondenza degli spigoli le linee devono dare un effetto di continuità.
2. I vertici non devono presentare linee di intersezione della geometria Voronoi.
3. Le facciate di grandi dimensioni devono avere un pannello al centro svincolato dai lati.
4. I pannelli devono avere dimensioni simili evitando che si formino superfici troppo piccole.

Su Rhinoceros creare un pattern Voronoi risulta davvero semplice se si dispone già dei punti da collegare al componente Voronoi. Senza una logica di disposizione precisa dei punti, l'effetto ottenuto potrebbe non essere quello desiderato. E' importante quindi definire, tramite i comandi di Grasshopper, la posizione precisa dei punti sulla geometria permettendo ad alcuni di muoversi al fine di controllare minuziosamente la formazione dei pannelli nel rispetto dei requisiti elencati precedentemente.

A differenza del processo con il quale è stata generata la forma, il pattern Voronoi è stato gestito in una fase successiva, per questioni di complessità formale, facendo riferimento alla specifica geometria scelta, attraverso la modifica manuale dei parametri di controllo.

Prima ancora di selezionare i punti è opportuno

Fig. 16

## Inputs Voronoi

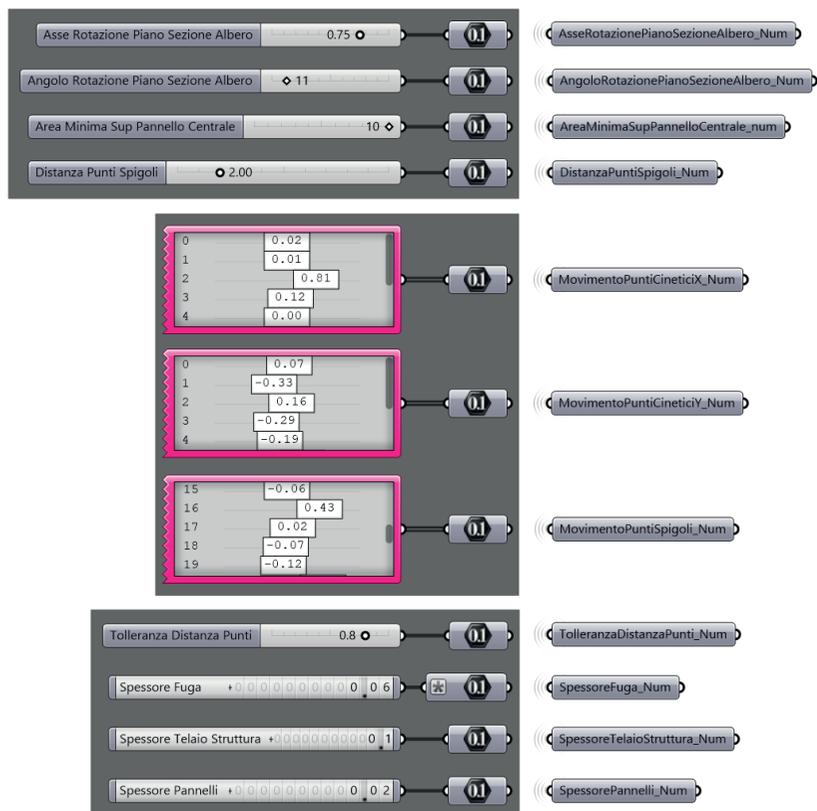


Fig. 16 Script sugli input per la creazione dell'involucro Voronoi.

**Deconstruct Brep:** scompone una Brep nelle sue diverse componenti (facce, spigoli e vertici).

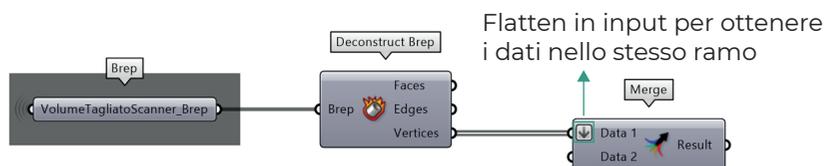
**Merge:** risolve l'unione dei dati presenti all'interno del Data Tree. I dati inseriti appartenenti allo stesso ramo verranno inseriti all'interno della stessa lista.

Fig. 17 Script sull'unione dei vertici tramite il componente Merge.

scomporre il solido nelle sue principali componenti con il comando **Deconstruct Brep**, successivamente per far fronte ai primi due requisiti, sono stati selezionati tutti i vertici dall'output e collegati al comando **Merge**. Quest'ultimo unisce diverse informazioni contenute in più liste al fine di fonderle in un unico Data Tree. Se i dati inseriti fanno parte di percorsi (branch) diversi, essi non verranno fusi ma uniti in sequenza all'interno di una lista di liste partendo dal percorso più basso.

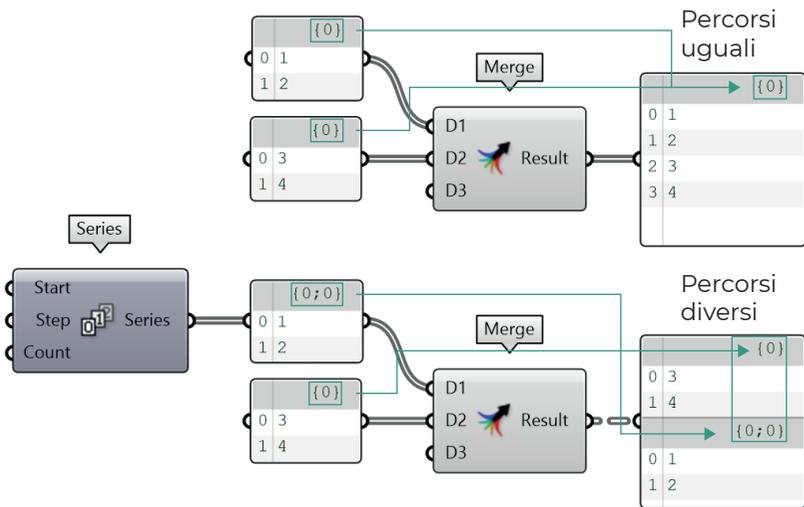
Fig. 17

## Selezione vertici



## Merge

Fig. 18



In seguito si è calcolata la lunghezza degli spigoli, con il comando **Length**, per individuare il numero di punti da inserire lungo le linee. Con il rapporto fra la lunghezza degli spigoli e una distanza da noi attribuita, pari a 2 metri, si è individuato il numero di punti collegando l'output al componente Integer per ottenere un numero intero. Questo valore è stato poi sommato a 1, all'interno dell'input del comando **Divide Curve**, in modo da avere sempre almeno un punto lungo lo spigolo nel caso in cui il risultato dell'operazione precedente fosse stato 0.

Il dominio delle curve utilizzate nel componente Divide Curve è stato modificato nell'input di comando attraverso il **Reparameterize** per ricavare i parametri della curva e ottenere così i punti equidistanti uno dall'altro.

Fig. 18 Script sul funzionamento del componente Merge.

**Length:** calcola la lunghezza di una curva.

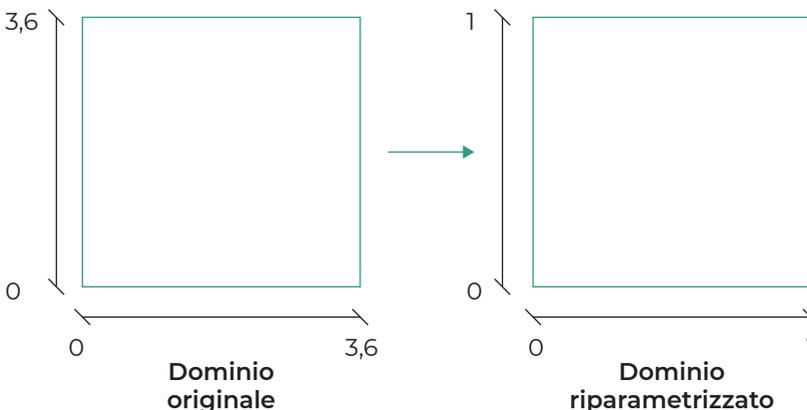
**Divide Curve:** suddivide una curva in segmenti aventi la stessa lunghezza.

**Reparameterize:** imposta qualsiasi dominio in un range che va da 0 a 1.

Fig. 19 Schema sul funzionamento del Reparameterize rispetto ad un ipotetico dominio di un quadrato.

## Reparameterize

Fig. 19





## Selezione punti pannelli cinetici

Fig. 22

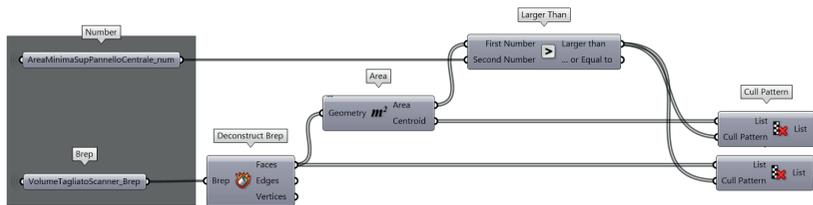


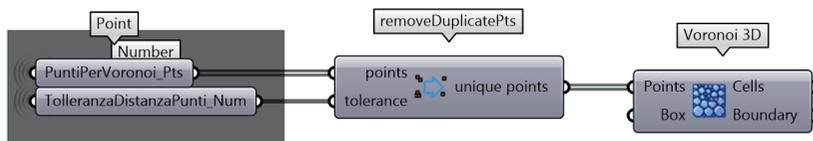
Fig. 22 Script sulla selezione dei punti posti al centro delle facce con area maggiore di 10 metri quadrati tramite il comando Cull Pattern.

Infine, prima di collegare i punti al componente **Voronoi 3D**, si è proceduto all'eliminazione dei duplicati con il comando **removeDuplicatePts** impostando una tolleranza pari a 0,8 per evitare la creazione di celle Voronoi troppo piccole.

**Voronoi 3D:** crea un pattern Voronoi tridimensionale partendo da una serie di punti spaziali.

## Voronoi 3D

Fig. 23



**removeDuplicatePts:** rimuove i punti duplicati rispetto ad una tolleranza.

Fig. 23 Script sulla creazione del Voronoi tridimensionale.

Individuato il pattern Voronoi tridimensionale con il Voronoi 3D, si è passato all'intersezione con la forma per ricavare le linee di suddivisione delle celle. Le polilinee chiuse delle celle a contatto con la geometria, sono infine state ricavate con il comando Brep | Brep intersecando la Brep del volume e le celle dell'output del Voronoi 3D.

Per realizzare le fughe, sono state associate le singole linee delle celle Voronoi alle superfici di appartenenza prendendo il punto centrale di ogni linea e calcolando la loro distanza rispetto alle superfici che compongono la geometria con il comando **Surface Closest Point**. Con il comando **Member Index**, si è utilizzato il valore 0 come input di Member per individuare i punti con distanza nulla rispetto alle facce. Per usare il comando **Polyline Offset**, componente presente nel plugin Clipper, è necessario associare un piano bidimensionale ad ogni linea in modo da muoverle rispetto alla faccia sulla quale risiedono. Tramite il comando Evaluate Surface sono state trovate le coordinate dei piani usate successivamente per costruire i piani con il **Construct Plane**. Per i pannelli cinetici, posti centralmente alle facce, è stato utilizzato il comando **Offset Curve Loose** per definire la dimensione

**Surface Closest Point:** individua il punto più vicino ad una superficie.

**Member Index:** individua uno specifico elemento all'interno della lista.

**Polyline Offset:** crea una curva identica a quella in input traslandola su un piano.

**Construct Plane:** crea un piano bidimensionale partendo dall'origine e le sue due coordinate cartesiane.

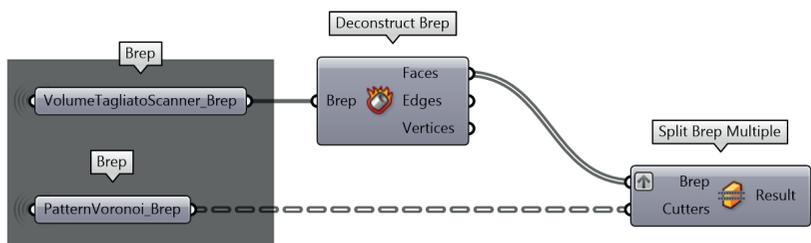
**Offset Curve Loose:** crea una curva identica a quella in input traslandola su un piano partendo dai punti di controllo.

della struttura che sorregge i pannelli e il meccanismo cinetico.

Le linee ricavate dagli altri pannelli sono state impiegate per creare le fughe sottraendole alla geometria finale con il comando **Split Brep Multiple**.

Fig. 24

### Pannelli Voronoi



**Split Brep Multiple:**  
suddivide una Brep  
utilizzando una serie di  
Breps.

**Fig. 24** Script sulla  
pannellizzazione  
delle facce tramite il  
comando Split Brep  
Multiple.

## 9.4 Interni

La pavimentazione, rispetto all'involucro, si porta dietro delle riflessioni legate principalmente al raggiungimento di determinate esigenze degli utenti. Un ambiente adibito all'apprendimento dei bambini, al lavoro in remoto e alla Forest Therapy, necessita di spazi particolari nel quale è possibile avere un contatto diretto con la natura e allo stesso tempo disporre di sedute e di tavoli per sostare e intraprendere diverse attività.

All'interno del nostro volume il contatto con la natura è specialmente di carattere tattile e visivo grazie alla presenza dell'albero che gli passa attraverso. Il rapporto con il quale l'utente si relaziona con questa realtà, deve essere studiato in base a specifici fattori di tipo formale dell'albero, così come ad esigenze legate alla sicurezza e all'accessibilità degli utenti stessi.

L'ingombro della parte di albero che attraversa il volume riguarda specificatamente il fusto e le sue proprietà morfologiche. L'altezza, l'inclinazione e il diametro del tronco sono i principali vincoli da utilizzare nel processo computazionale da tramutare poi in dati quantificabili dal software.

L'accesso al piano di calpestio rialzato è garantito dalla presenza di una rampa per persone con ridotta o impedita capacità motoria che si estende lungo il perimetro del volume ad una specifica distanza per mantenere un rapporto formale con la geometria. Così facendo l'impatto visivo della rampa viene ridotto mantenendo il focus sul volume di progetto. L'altezza della rampa arriva ad un massimo di 0,80 metri necessitando di un cordolo di altezza minima di 10 centimetri lungo tutta la rampa. Diametralmente opposto alla rampa è stata posizionata una scalinata che collega direttamente alla piattaforma nella quale è posta l'entrata.

Il varco di ingresso alla struttura è stato ricavato rimuovendo una parte di pannelli Voronoi presenti in una delle facce avente un accesso utile preventivamente calcolato tramite script. Questo controllo è utile al fine di filtrare ed evitare le geometrie che non possiedono superfici utili abbastanza grandi da ospitare un accesso. Definita l'accessibilità esterna il passo successivo è stabilire una logica compositiva dello spazio interno considerando le dimensioni del piano di calpestio, il rapporto che intercorre fra utente, struttura e albero e l'accessibilità.

L'albero rappresenta il fulcro dal quale sviluppare l'interno per ricavare sia lo spazio per circolare che per sedersi. Le sedute sono state messe il più esternamente possibile per creare uno spazio centrale di passaggio intorno all'albero facendolo risaltare rispetto alla disposizione degli interni. La presenza dell'albero è enfatizzata dalla concentricità dello spazio ricavato e dal volume che si estende in corrispondenza di esso. Il susseguirsi di questi passaggi contribuiscono a creare una spazialità sempre diversa tramite l'utilizzo di un pattern Delaunay a pavimento. La triangolazione della trama verrà usata come base per la formazione delle sedute generando forme irregolari e spigolose.

L'analisi preliminare delle esigenze degli utenti e dei requisiti ha portato all'individuazione dei vincoli determinanti alla creazione dello script per la pavimentazione, traducibili in limiti quantificabili, che sono:

1. Dimensioni dell'albero
2. Accessibilità e circolazione

Fig. 25

### Inputs interni

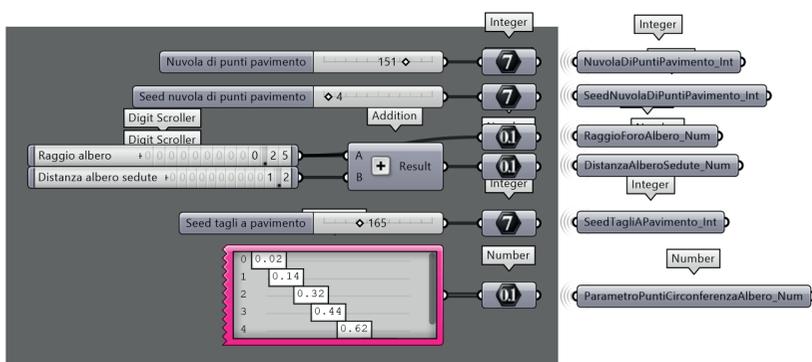


Fig. 25 Script sugli input per la creazione degli interni.

# 1. Pattern Delaunay a pavimento

Richiamando la stessa logica generatrice della forma, attraverso dei punti spaziali per la determinazione di un pattern Delaunay, il pavimento assume diverse conformazioni nel rispetto delle esigenze degli utenti.

Partire da una triangolazione Delaunay è come partire da un pattern Voronoi, per entrambi è necessario impostare una serie di punti che abbiano una logica specifica in vista del risultato che ci si aspetta. Il primo step riguarda l'individuazione dei punti sulla superficie di calpestio, ricavata precedentemente, e i punti sul perimetro per chiudere la geometria Delaunay.

Con il comando Deconstruct Brep, si sono ricavati gli spigoli per individuare i punti esterni tramite il componente Divide Curve. Successivamente sono stati inseriti una serie di punti all'interno del poligono di riferimento tramite il **Populate Geometry**. Il numero di punti varia in base a quanto risultano grandi i triangoli generati dal comando **Delaunay Edges**, maggiore è il numero e minore sarà la loro dimensione. Per le dimensioni ricavate del piano di calpestio si è utilizzato 100 come numero di punti. Per quelli posti in prossimità del perimetro ad una distanza inferiore a 20 centimetri sono stati rimossi tramite il comando **Curve Closest Point** e Cull Pattern, onde evitare la formazione di triangoli di piccole dimensioni.

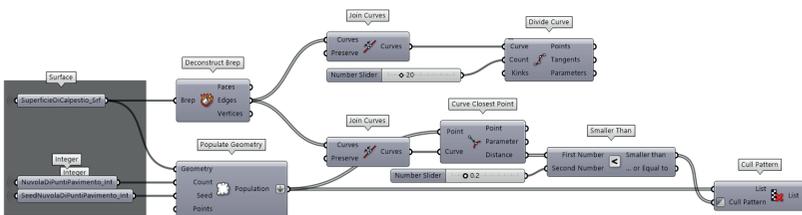
**Populate Geometry:** popola una geometria generica con una serie di punti.

**Delaunay Edges:** crea un pattern Delaunay partendo da una serie di punti disposti su un piano.

**Curve Closest Point:** individua il punto più vicino ad una curva.

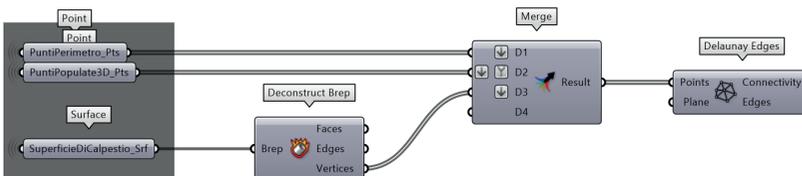
## Selezione punti

Fig. 26



## Pattern Delaunay

Fig. 27



**Fig. 26** Script sulla selezione dei punti sulla superficie di calpestio tramite il comando Populate Geometry.

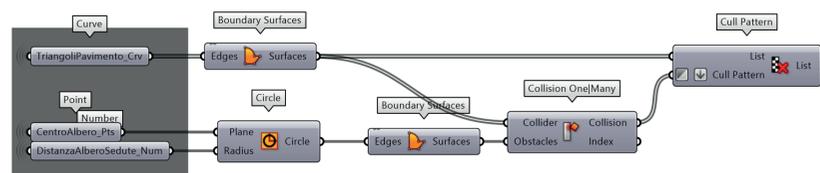
**Fig. 27** Script sulla definizione del pattern Delaunay a Pavimento tramite il comando Delaunay Edges.

## 2. Selezione pattern per sedute

Attraverso il dimensionamento a raggiera dei vincoli formali dell'albero e lo spazio utile alla circolazione, sono stati selezionati i triangoli del pattern a pavimento esterni alla circonferenza utile di passaggio degli utenti.

Con l'uso di due **Digit Scroller**, si è impostato il raggio del tronco, di 25 centimetri, e la distanza utile di circolazione fra l'albero e le sedute pari a 1,2 metri. Sommando i due valori si ottiene il raggio della circonferenza, generata con il comando **Circle** e avente come centro il medesimo punto di origine del tronco, entro la quale verranno rimossi i triangoli inclusi o a contatto con essa. Attraverso il componente **Collision One|Many** e Cull Pattern si sono mantenuti i soli triangoli esterni al cerchio.

Fig. 28 Selezione pattern Delaunay utile



**Digit Scroller:** valore numerico univoco modificabile tramite scroller.

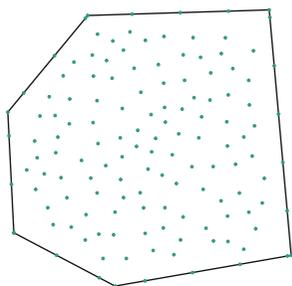
**Circle:** crea un cerchio definendo il piano e il raggio.

**Collision One|Many:** verifica l'intersezione fra una geometria e diverse geometrie (true/false).

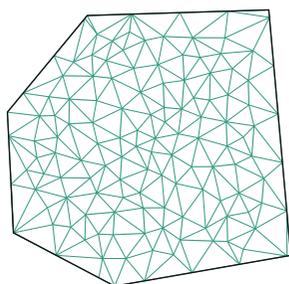
**Fig. 28** Script sulla selezione del pattern Delaunay a Pavimento per le sedute tramite il componente Cull Pattern.

Il pattern Delaunay risultante da questo processo è stato in seguito gestito manualmente modificando i parametri, in particolar modo il Seed del Populate Geometry, per adattare la disposizione dei triangoli e migliorare esteticamente e funzionalmente la disposizione delle sedute.

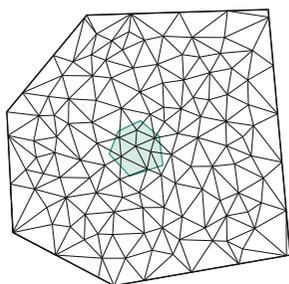
Disponendo le sedute lungo il perimetro sono state selezionate delle porzioni da adibire a tavoli in corrispondenza dei pannelli cinetici in modo da aumentare la quantità di luce agente sulle relative superfici. I volumi dei posti a sedere e dei tavoli sono stati realizzati tramite una semplice estrusione, poste ad altezze diverse, delle geometrie a pavimento, ricavando delle sedute estraibili da sotto i tavoli in momenti di necessità.



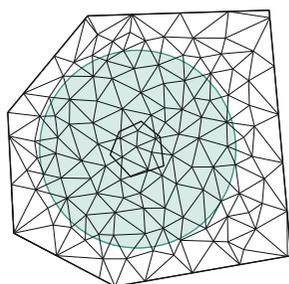
Generazione dei punti all'interno della superficie di calpestio



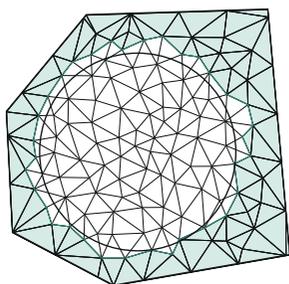
Creazione della triangolazione Delaunay



Foro geometrico per il passaggio del tronco dell'albero



Individuazione spazio di circolazione utile intorno all'albero



Selezione dei triangoli esterni alla circonferenza per le sedute

Fig. 29 Step del processo computazionale per la creazione delle sedute. Elaborato personale.

## 9.5 Wallacei X

Wallacei X è il componente principale con il quale è possibile svolgere analisi evolutive, confrontare i risultati ottenuti e selezionare le soluzioni ottimizzate attraverso specifici metodi, tramite un algoritmo genetico chiamato NSGA-II. All'interno dell'interfaccia è presente anche una guida alle basi del plugin e una sezione dedicata alla community.

Prima di analizzare l'interfaccia e il suo utilizzo per il progetto per lo Spazio Thetis, è importante definire in che modo opera l'algoritmo genetico NSGA-II.

### Principi base dell'NSGA-II

L'NSGA-II è un algoritmo genetico multi-obiettivo che utilizza una classificazione di soluzioni secondo un ordine di dominanza, definita "non-dominated sorting". Le soluzioni che all'interno della popolazione non sono dominate da altre soluzioni avranno un rank pari a 0, nel caso specifico di Wallacei. Queste soluzioni fanno parte del fronte di dominanza, o Pareto front, e rappresentano tutti quei risultati che non sono dominati da altri. Come è stato trattato nel capitolo relativo al Generative Design, il Pareto front contiene una serie di soluzioni potenzialmente efficienti in risposta al problema da risolvere. L'evoluzione del presente algoritmo genetico è dovuta al miglioramento di alcune fasi di analisi del predecessore, l'NSGA. Le principali critiche dell'approccio dell'NSGA sono state:

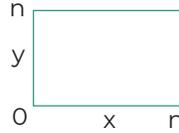
1. Alta complessità nel calcolo delle soluzioni non dominate
2. Mancanza di elitismo<sup>1</sup>

La complessità di calcolo per un solver multi-obiettivo condiziona fortemente la durata nel quale vengono analizzate le diverse soluzioni e implica un numero ridotto di risultati da poter simulare. L'elitismo, in un algoritmo genetico, permette l'inserimento dei migliori risultati ottenuti in una popolazione nella generazione successiva, aumentando la possibilità di esplorare soluzioni ancora più ottimizzate. Con l'NSGA-II si ha un miglioramento delle dinamiche di analisi e di selezione dei risultati nel corso delle generazioni.

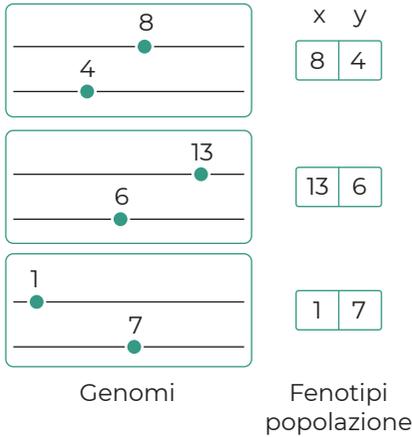
<sup>1</sup> Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, *A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II* in «IEEE Transactions on Evolutionary Computation», vol 6, 2002, p. 182.

## Principio di funzionamento dell NSGA 2 Fig. 30

Ipotizzando due slider (genomi) da 0 a n che rappresentano i lati di un rettangolo, l'obiettivo è quello di massimizzare l'area attraverso l'algoritmo genetico.

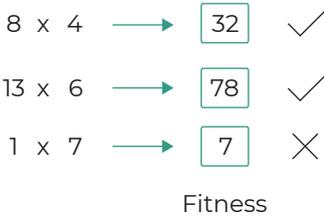


### 1. Popolazione



Il primo step è quello di determinare il numero di elementi (popolazione) per ogni generazione. Una volta scelto verranno accoppiati i genomi in modo casuale per creare la popolazione della prima generazione.

### 2. Calcolo Fitness



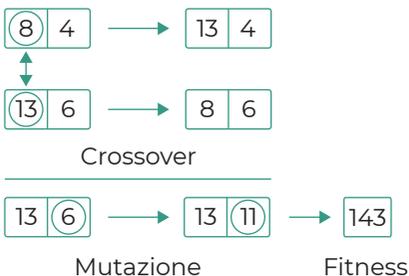
Il fitness corrisponde al valore associato ad ogni soluzione, in questo caso l'area, e mostra quanto questo valore rispecchi i requisiti posti in fase di calcolo (massimizzare l'area).

### 3. Selezione genitori



Una volta ricavati i fitness si passa alla selezione dei valori per la generazione della popolazione successiva. Dovendo massimizzare l'area, i valori più grandi avranno una maggiore probabilità di essere scelti e combinati fra loro.

### 4. Crossover e Mutazione



Nell'ultima fase vengono accoppiati i valori scelti tramite crossover e mutazione. Nel crossover i genomi vengono scambiati fra i fenotipi secondo metodi diversi. La mutazione, successiva al crossover, avviene in modo casuale su uno o più genomi e in una piccola percentuale dei fenotipi.

**Fig. 30** Schema sul principio di funzionamento dell'algoritmo NSGA 2 tramite esempio. Elaborato personale.

Nel corso della realizzazione dello script per la creazione della geometria di progetto, sono stati individuati i principali obiettivi al fine di ottimizzare la forma. Gli obiettivi da analizzare possono essere diversi ma è importante limitarsi al minor numero al fine di evitare un aumento eccessivo del calcolo di simulazione del solver e facilitare la successiva analisi degli output. Un ulteriore aspetto importante è dato dal modo in cui Wallacei gestisce i dati per poi ottimizzarli. Di default il motore evolutivo tende a minimizzare i dati in input, pertanto, è necessario controllare il modo in cui vengono inseriti i dati che si vogliono massimizzare, inoltre, siccome Wallacei analizza le informazioni sotto forma di numeri, è fondamentale trasformare i problemi di natura geometrica in valori quantificabili secondo una logica progressiva. Il numero più piccolo deve quindi essere associato alla soluzione ottimale e il numero più grande a quello peggiore.

## Genes

I Genes, o genomi, indicano i valori che possono variare e in Grasshopper sono rappresentati dai Number Slider o dai Gene Pool. Questi genomi vengono utilizzati come input nei diversi componenti per variare la geometria secondo specifiche azioni: rotazione, traslazione, incremento punti o altro.

Una nota interessante sull'uso dei Genes, verificata in seguito alle diverse analisi tramite solver, riguarda l'uso di valori che modificano il Seed di un qualsiasi componente. Generando casualità, che non segue una logica di tipo incrementale, per il motore evolutivo risulta impossibile gestire il valore se non può essere codificato e analizzato progressivamente nelle diverse generazioni. Per questo motivo i Seed non sono stati collegati al solver.

## Objectives

All'interno del componente di Wallacei X, gli obiettivi sono identificati come "Objectives" e secondo un preciso studio ne sono stati scelti quattro. In seguito ad un'analisi preliminare dettata dal concept di progetto e il conseguente rapporto fra albero e struttura, gli obiettivi scelti risultano essere:

1. Area utile del piano di calpestio.
2. Altezza del volume.

3. Controllo dei lati corti.

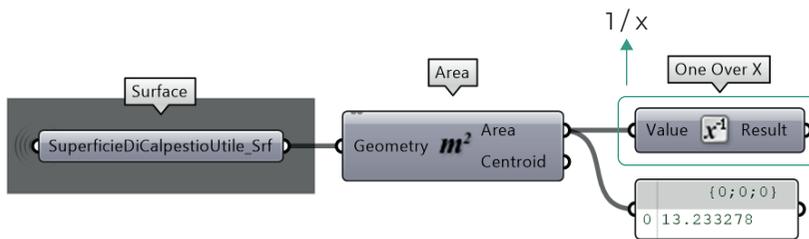
4. Distanza del baricentro dell'albero rispetto al centro del piano di calpestio.

Il calcolo dell'area utile avviene subito dopo aver individuato l'intersezione fra il piano di riferimento e la geometria.

Per il calcolo si procede collegando la superficie ottenuta al comando Area, dopodichè, dovendo massimizzare il valore, si è utilizzato il componente **One Over X**. Inserendo il valore in output del componente One Over X al solver, esso tenderà a minimizzarlo con un conseguente aumento dell'area di calpestio.

**Objective 1 - Area utile**

**Fig. 31**



x	1/x	→	1/10	→	0,1
10	1/x	→	1/20	→	0,05
20	1/x	→		→	

La selezione di Wallacei avviene prendendo i valori più piccoli, pertanto utilizzando il componente One Over X, all'aumentare dell'area diminuirà il risultato

L'altezza del volume dipende esclusivamente dall'altezza utile del tronco dell'albero, libero da ostacoli quali rami e foglie. La presenza di un ramo comporterebbe un'ulteriore complessità nella definizione della geometria ed è il principale motivo per il quale si è ritenuto opportuno tenere in considerazione le sole dimensioni del fusto.

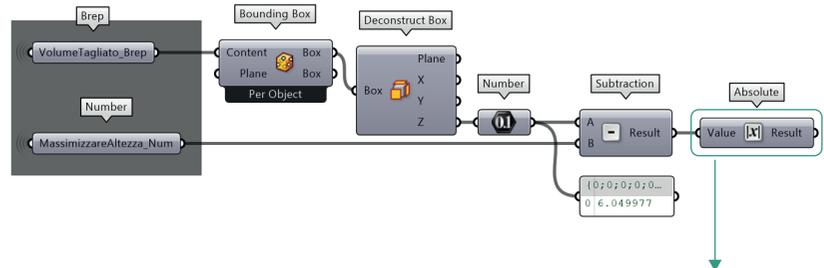
Con l'utilizzo del Bounding Box, applicato alla geometria già rettificata, è stata calcolata la dimensione nella direzione dell'asse Z attraverso il comando Deconstruct Box. Uno dei modi per convertire l'output, restituito sotto forma di dominio, in lunghezza, è quello di collegarlo al componente Number. Per ottenere una forma ottimizzata secondo la specifica altezza del tronco, bisogna sottrarre il valore ottenuto dal Deconstruct Box all'altezza libera del fusto di modo che, ad un numero

**One Over X:** pone un valore in una frazione  $1/x$ , dove  $x$  corrisponde all'input.

**Fig. 31** Script sulla definizione del primo obiettivo calcolando il reciproco del valore tramite il componente One Over X.

relativamente basso corrisponda un valore prossimo al target.

**Fig. 32 Objective 2 - Altezza volume**



Impostando il numero in valore assoluto tramite il comando Absolute, si evitano valori negativi che comporterebbero un errato raggiungimento dell'obiettivo.

Un'altra verifica importante dal punto di vista strutturale, è il controllo della formazione di lati troppi corti che in fase di prototipazione potrebbero generare problemi di realizzazione.

Arrivati a questo punto è opportuno menzionare il fatto che gli obiettivi da inserire in input a Wallacei devono riassumersi in un unico valore, utilizzare una lista di valori per raggiungere un unico obiettivo comporterebbe un incremento nella complessità di calcolo e i risultati non sarebbero neppure ottimizzati. Nel caso del controllo della lunghezza dei lati, non è possibile collegare quindi una lista con i valori delle lunghezze di ogni singolo spigolo della geometria in quanto l'analisi di Wallacei restituirebbe come soluzioni ottimali quelle geometrie aventi pochi lati corti. L'obiettivo finale è quello di ottenere una geometria senza lati corti.

Per ovviare al problema è stato costruito uno script utilizzando una logica booleana. Se per esempio il valore è uguale a 2, la geometria non presenta lati corti, se è uguale a 20 allora sono presenti. In questo modo anche dopo aver analizzato migliaia di soluzioni, se una geometria presenta il valore 20 nel terzo obiettivo, può essere subito scartata.

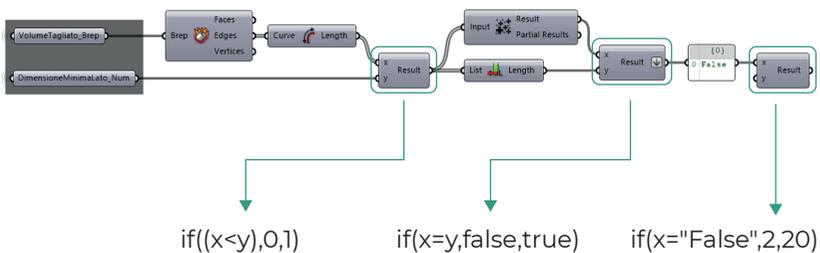
**Fig. 32** Script sulla definizione del secondo obiettivo in valore assoluto tramite il componente Absolute.

Con il comando Length sono state calcolate le lunghezze dei vertici dopo aver esploso la geometria con il comando Deconstruct Brep, successivamente con il comando

Expression si è posta una condizione per controllare se le lunghezze risultano minori di un valore minimo di lunghezza dello spigolo. I risultati, ottenuti sotto forma di 0 e 1, sono stati sommati con il componente **Mass Addition**. Al valore 0 corrisponde un lato inferiore alla lunghezza minima fissata. Sommando quindi i valori, se il risultato finale è inferiore al numero di lati, calcolati con il comando **List Length**, la geometria presenta almeno un lato corto. Infine tramite il comando Expression è stato attribuito il numero relativo alla geometria, 20 per quelle con lati corti e 2 per quelle senza.

**Objective 3 - Lati corti**

**Fig. 33**



L'ultimo obiettivo è legato al tipo di albero e alle sue proprietà geometriche. Partendo dall'idea che la forma va a rastremarsi in corrispondenza del tronco e avendo scelto un pioppo bianco selvatico con fusto eretto, è stato impostato il baricentro in corrispondenza del punto più alto della geometria ricavata. Scomponendo la forma con il Deconstruct Brep, si è utilizzato il comando **Deconstruct** per individuare il punto con la coordinata Z più alta. Per ricavarla è stato collegato l'output "Z component" con il componente **Sort List** dove data una lista, i valori vengono ordinati dal più piccolo al più grande. Per ottenere il valore più alto è stato applicato un Reverse nell'output della lista e selezionato il primo index tramite List Item.

Con il comando Surface Closest Point, si è collegato l'output del List Item nell'input "Point" e il piano di calpestio, precedentemente scalato per individuare la perpendicolare al piano qualora il punto fosse decentrato, nell'input "Surface". E' stata calcolata, infine, la distanza fra il punto ricavato e il punto centrale del piano di calpestio. Minore è la distanza, più centrato sarà il tronco dell'albero.

**Mass Addition:** somma i valori presenti all'interno di una lista.

**List Length:** individua il numero di elementi presenti all'interno di una lista.

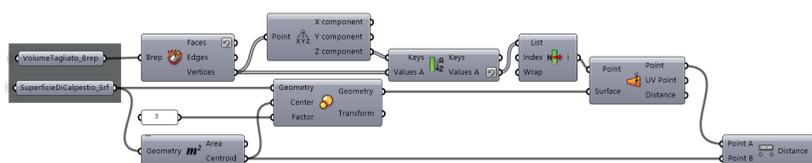
**Fig. 33** Script sulla definizione del terzo obiettivo individuando i lati inferiori a 40 cm tramite il componente Expression.

**Deconstruct:** scompone un punto nelle sue coordinate cartesiane xy e z.

**Sort List:** riordina gli elementi all'interno di una lista partendo dal più piccolo.

Il processo di individuazione degli obiettivi e la resa tramite script, richiede una particolare attenzione per evitare di svolgere analisi lunghe per poi accorgersi di aver impostato i dati erroneamente. E' importante anche capire il rapporto che intercorre fra i diversi obiettivi per far fronte a possibili contrasti dove l'ottimizzazione di un obiettivo comporta un significativo aggravamento di un altro.

**Fig. 34 Objective 4 - Distanza albero/baricentro**



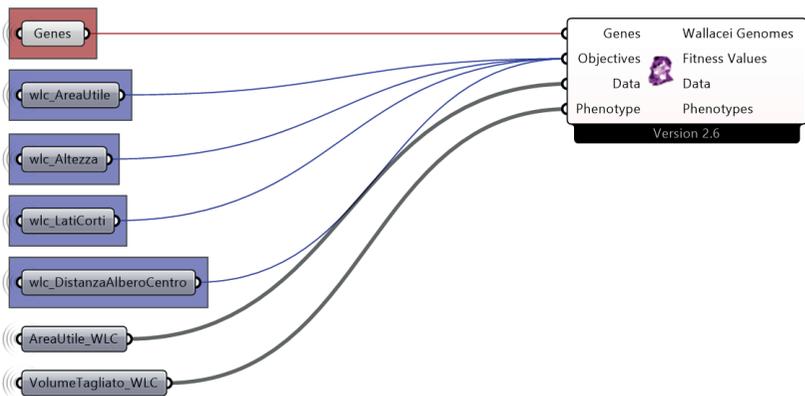
## Data e Phenotype

Il Data è un qualsiasi tipo di informazione utilizzato come elemento di analisi di ogni soluzione generata. Può essere uno degli obiettivi precedentemente analizzati o un dato completamente diverso. E' sconsigliato l'utilizzo di geometrie per evitare un sovraccarico di dati durante la fase di simulazione.

Il Phenotype, così come il Data, accetta qualsiasi tipo di dato. Diversamente dal Data, però, è consigliato collegarlo al solver al termine delle analisi per non rallentare il processo. Una volta terminato e collegato nell'input del solver, verrà poi utilizzato come output principale da Wallacei per mostrare visivamente i risultati ottenuti dalla simulazione.

Nel progetto in analisi, il Data utilizzato corrisponde all'area della superficie di calpestio, ritenuto uno dei principali vincoli secondo il quale basare le successive scelte compositive. Se ad un primo impatto il risultato del Data non dovesse essere soddisfacente sarà più semplice escluderlo senza dover controllare scrupolosamente il risultato degli obiettivi inseriti. Il fenotipo rappresenta invece la geometria di progetto ricavata dall'esportazione.

**Fig. 34** Script sulla definizione del quarto obiettivo individuando la distanza dell'albero dal baricentro della superficie di calpestio tramite il componente Distance.

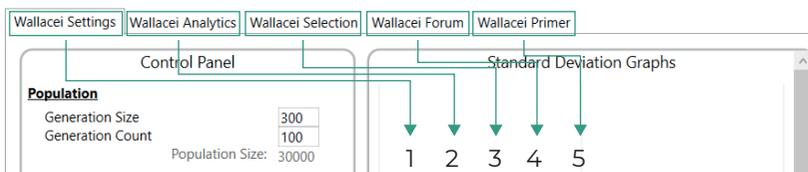


## Interfaccia Wallacei

L'interfaccia di Wallacei X è organizzata secondo una successione schematica accessibile tramite doppio click sull'immagine centrale del componente. Si aprirà una finestra divisa in cinque sezioni:

1. Wallacei Settings
2. Wallacei Analytics
3. Wallacei Selection
4. Wallacei Forum
5. Wallacei Primer

## Sezioni Fig. 36



Nella prima sezione è possibile determinare le impostazioni della simulazione e monitorarne il progresso mentre è in corso. A sinistra della schermata è presente il "Control Panel", la cella principale nella quale vengono calibrati i settaggi dell'algorithm e controllati i progressi della simulazione.

I settaggi indicati di seguito sono riferiti alla specifica analisi per ottenere la geometria di progetto.

**Fig. 35** Input del solver di Wallacei.

**Fig. 36** Sezioni dell'interfaccia di Wallacei X.

Per creare diversità all'interno delle generazioni, oltre al settaggio dei parametri dell'algoritmo, è stata utilizzata una popolazione di 300 elementi iterabili in 100 generazioni. Aumentando il numero del "Generation Size", le possibilità di spaziare tra forme diverse fra loro aumenta. Se incrementato troppo, la simulazione terminerà dopo diverse ore con un conseguente rallentamento dell'interfaccia utente nelle successive fasi di analisi e selezione dei risultati. Nel caso specifico del nostro progetto la simulazione è durata 1 ora e 30 minuti, dopodichè l'interfaccia presentava dei consistenti rallentamenti, seppur gestibili, di diversi minuti nei successivi passaggi. I parametri dell'algoritmo non sono stati modificati in quanto ritenuti soddisfacenti per le soluzioni generate. Ciò nonostante è utile avere un'idea del loro funzionamento:

- **Crossover Probability:** indica la percentuale di soluzioni che si riproducono nella generazione successiva. Un valore pari a 0.9 corrisponde al 90% con uno scarto delle soluzioni del 10%. In questo modo una percentuale alta garantisce la riproduzione delle soluzioni ritenute ottimali dal motore evolutivo.

- **Mutation Probability:** indica la percentuale di mutazioni all'interno di una generazione. Il valore consigliato secondo i creatori è pari a  $1/n$ , dove  $n$  rappresenta il numero di slider presenti nei Genes. Maggiore è il numero di slider, minore è la probabilità che vengano effettuate mutazioni.

- **Crossover Distribution Index:** il valore, compreso fra 0 e 100, indica la vicinanza dei crossover ai genitori. Maggiore è il valore, maggiore sarà la somiglianza dei crossover della generazione rispetto a quella precedente.

- **Mutation Distribution Index:** la logica è la stessa del Crossover Distribution Index ma per le mutazioni.

- **Random Seed:** cambia la casualità con la quale viene generata la prima popolazione.

Fig. 37

### Crossover Hex Color



Fig. 37 Esempio grafico del crossover sui valori Hex dei colori.  
Elaborato personale.

Wallacei Settings | Wallacei Analytics | Wallacei Selection

**Control Panel**

**Population**

Generation Size:  → Popolazione

Generation Count:  → Generazioni

Population Size: 30000

**Algorithm Parameters**

Crossover Probability:

Mutation Probability:  1/n

Crossover Distribution Index:  → Parametri algoritmo

Mutation Distribution Index:

Random Seed:

**Simulation Parameters**

No. of Genes (Sliders): 54

No. of Values (Slider Values): 7452

No. of Fitness Objectives: 4

Size of Search Space: 6.6e114

**RunTime** ● Number of nulls:

Current Solution / Generation

Number of Pareto Front Solutions

Eval. Time Per Solution

Estimated Time Remaining

Simulation Runtime:  → Durata simulazione

**Dynamic Graphs Preferences**

Dynamic Parallel Coordinate Plot:

Dynamic Standard Deviation Graph:

Dynamic Objective Space:

Dynamic Pareto Front Solutions:

Autosave:

Minimize Rhino On Start:

A destra del “Control Panel” è presente lo “Standard Deviation Graphs” ad indicare la variazione dei fitness presenti all’interno di ogni generazione. Le curve mostrano la prima e le ultime 50 generazioni, dalla rossa alla blu.

Il “Parallel Coordinate Plot” rappresenta i fitness, ovvero gli obiettivi, identificati tramite una linea. I valori posti all’estremità più bassa della linea indicano i valori più piccoli e secondo quanto è stato precedentemente visto, a valori più piccoli corrisponde un fitness ottimizzato.

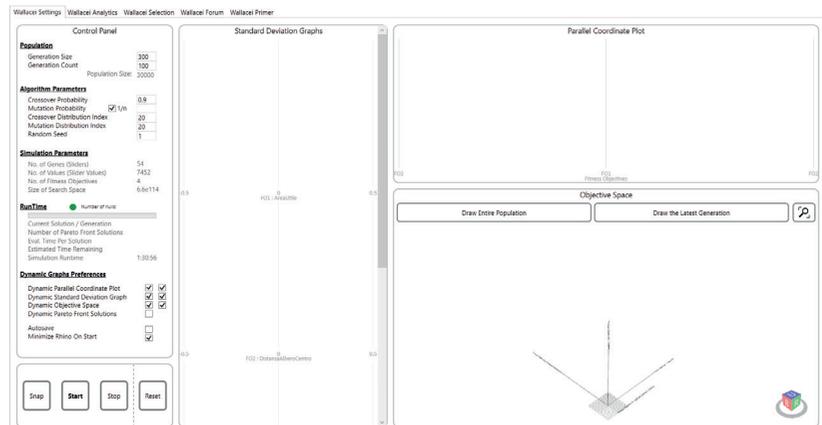
La cella “Objective Space” mostra l’insieme delle generazioni o l’ultima generazione all’interno di un grafico spaziale. Durante l’analisi del solver viene visualizzata la generazione corrente. Ad ogni asse corrisponde uno

Fig. 38 Pannello di controllo della sezione Wallacei Settings.

specifico fitness e in giallo vengono mostrati i Pareto front.

Infine in basso a sinistra sono presenti i tasti per fare una cattura della schermata (Snap), avviare la simulazione (Start), fermarla (Stop) e ripristinarla allo stato di partenza (Reset).

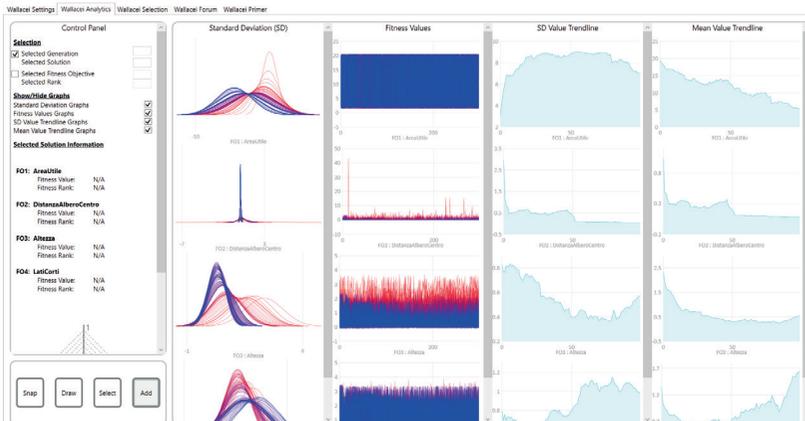
Fig. 39 Wallacei Settings



Terminata la simulazione, si passa alla seconda sezione. Nel “Wallacei Analytics” è possibile analizzare i risultati selezionando delle specifiche soluzioni. Diversamente dal “Wallacei Selection”, la selezione è limitata a due tipologie specifiche ed è possibile visualizzare una soluzione per volta. La prima avviene indicando specificatamente la generazione e la soluzione all’interno della popolazione mentre la seconda indicando il rank, da 0 al numero massimo di risultati (nello specifico caso del nostro progetto è uguale a 29999). Il valore 0 corrisponde alla migliore soluzione per lo specifico fitness selezionato. A destra della schermata sono presenti una serie di grafici utili all’analisi delle generazioni e delle soluzioni.

- **Standard Deviation:** indica la variazione standard di ogni generazione divisa per fitness.
- **Fitness Values:** mostra le soluzioni dalla prima all’ultima divisa per fitness. Ad ogni linea corrisponde una generazione e ad ogni punto un valore.
- **SD Value Trendline:** indica la variazione tra le Standard Deviation.
- **Mean Value Trendline:** rappresenta il valore medio del fitness per ogni generazione.

Fig. 39 Interfaccia della sezione Wallacei Settings.



Una caratteristica utile alle analisi nel “Wallacei Analytics” è il diamond chart, posto in basso a sinistra, dove ad ogni fitness corrisponde un numero progressivo partendo da 01. Per ottenere una soluzione ottimizzata, i valori dei fitness devono essere quanto più vicini al centro. Solitamente, all’ottimizzazione di un obiettivo corrisponde il peggioramento di un altro.

Fig. 41

Diamond chart

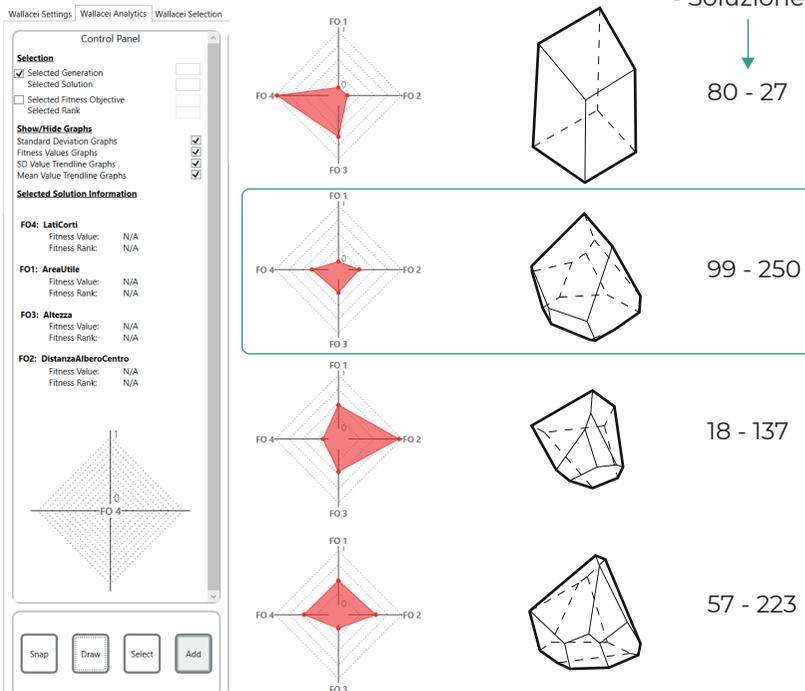


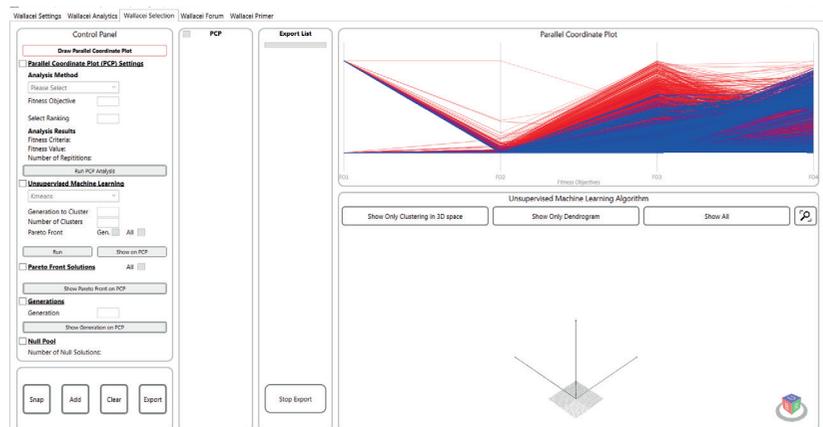
Fig. 40 Interfaccia della sezione Wallacei Analytics.

Fig. 41 Esempi di Diamond Chart di alcune soluzioni nelle diverse generazioni.

Il “Wallacei Selection” è probabilmente la sezione più importante per la scelta finale della geometria di progetto. All’interno di questa schermata, in particolare nel Control Panel, sono disponibili cinque metodi di selezione suddivisi per tipologia. A differenza della sezione precedente, qui è possibile selezionare anche più soluzioni contemporaneamente senza un limite di numero. Nel caso specifico del nostro progetto ci concentreremo nell’analizzare, in modo più specifico, tre metodi di selezione utilizzati durante questa fase. Nel complesso le cinque tipologie sono:

- **Parallel Coordinate Plot (PCP) Settings:** modifica le impostazioni di selezione delle soluzioni secondo le coordinate parallele presenti nel grafico in alto a destra.
- **Unsupervised Machine Learning:** raggruppa le soluzioni analizzando i dati tramite algoritmi di raggruppamento chiamati clustering.
- **Pareto Front Solutions:** mostra le soluzioni dominanti all’interno delle generazioni.
- **Generations:** permette la selezione di una specifica generazione contenente tutte le soluzioni al suo interno.
- **Null Pool:** mostra i valori nulli derivanti dalla simulazione.

Fig. 42 Wallacei Selection



Il Parallel Coordinate Plot è un sistema di rappresentazione utile per visualizzare e analizzare un insieme di dati multivariati, identificati come fitness su Wallacei. Prima ancora di selezionare una delle opzioni proposte nel Control Panel è necessario visualizzare le coordinate parallele premendo sul tasto “Draw Parallel Coordinate Plot” per consentire al solver di analizzare

Fig. 42 Interfaccia della sezione Wallacei Selection.

Control Panel

**Draw Parallel Coordinate Plot**

**Parallel Coordinate Plot (PCP) Settings**

**Analysis Method**

Please Select

Fitness Objective

Select Ranking

**Analysis Results**

Fitness Criteria:

Fitness Value:

Number of Repititions:

Run PCP Analysis

**Unsupervised Machine Learning**

Kmeans

Generation to Cluster

Number of Clusters

Pareto Front Gen.  All

Run Show on PCP

**Pareto Front Solutions** All

Show Pareto Front on PCP

**Generations**

Generation

Show Generation on PCP

**Null Pool**

Number of Null Solutions:

Obiettivo partendo da 1

Rank partendo da 0

617 valori fra tutte le generazioni

Generazione da 1 a 99

i dati simulati, dopodichè è possibile procedere alla selezione di uno dei metodi di analisi precedentemente visti.

Il Parallel Coordinate Plot (PCP) Settings prende in analisi uno dei metodi proposti nel menù a tendina. A seconda del metodo scelto, verranno mostrate le soluzioni inerenti nella casella dei risultati posta a fianco. Le opzioni per la prima tipologia di selezione sono:

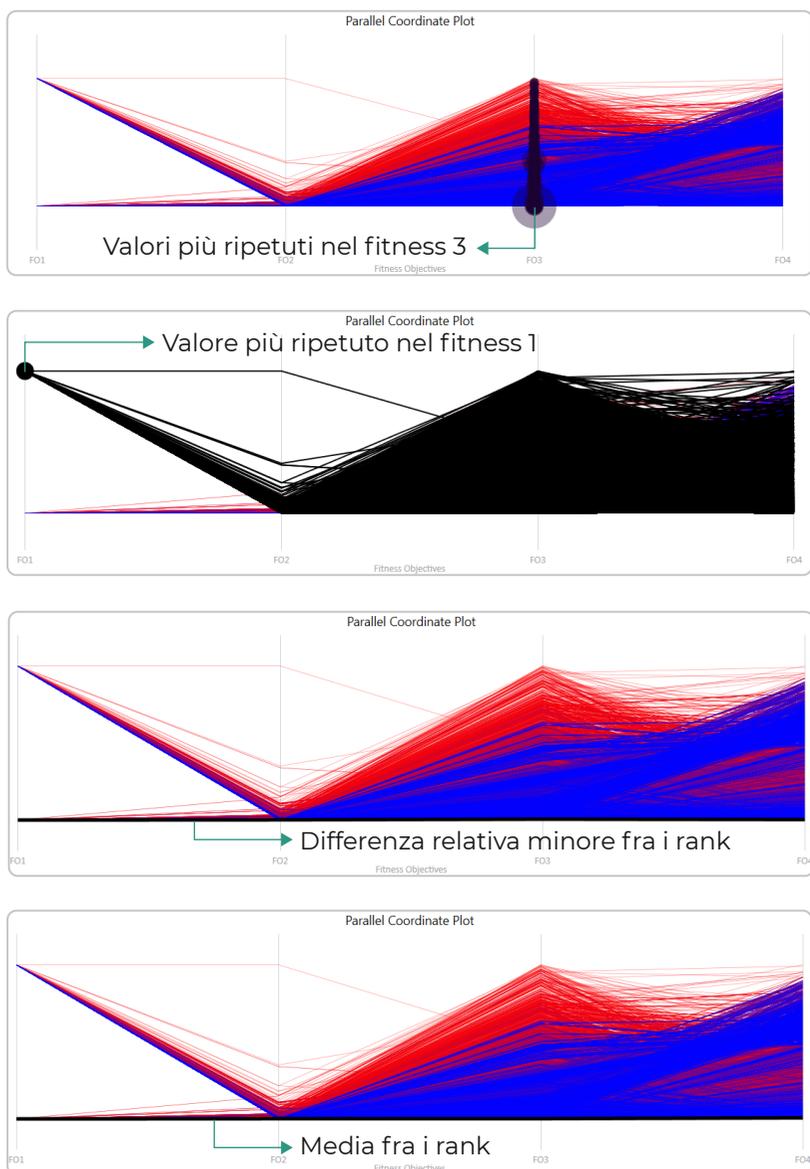
- **Repeated Fitness Values:** mostra le soluzioni più ripetute nelle generazioni di uno specifico fitness.
- **Solutions with Repeated Fitness Values:** mostra le soluzioni più ripetute nelle generazioni di uno specifico fitness associato ad un rank. Se il rank è uguale a 0, verrà mostrata la soluzione più ripetuta.
- **Relative Difference Between Fitness Rank:** seleziona

Fig. 43 Pannello di controllo della sezione Wallacei Selection.

una sola soluzione avente una variazione tra i fitness associata ad un rank. Se il rank è uguale a 0, verrà scelta la soluzione con minore variazione.

- **Average of Fitness Ranks:** seleziona una sola soluzione avente una variazione tra i rank rispetto ai diversi fitness. Se il rank è uguale a 0, verrà scelto il miglior rapporto fra i rank dei diversi fitness.

**Fig. 44 Parallel Coordinate Plot (PCP) Settings**



**Fig. 44** Grafici sulle tipologie di selezione del Parallel Coordinate Plot.

Per arrivare alla scelta della geometria di progetto si è passati dall'analisi dei risultati attraverso i metodi di selezione di Wallacei. All'interno della casella dei risultati sono poi state scelte le soluzioni, aggiunte alla lista di esportazione cliccando sul tasto "Add", presente anche nella sezione Wallacei Analytics, posto in basso a sinistra e infine sul tasto "Export" per aggiungerle come output al solver. Prima di esportare qualsiasi soluzione è fondamentale collegare la geometria di progetto generata dallo script al Phenotype di Wallacei X altrimenti si presenterà un errore di esportazione dovuto alla mancanza del dato. Con il tasto "Clear" le soluzioni presenti nella lista di esportazione viene pulita per lasciare spazio ad altre analisi.

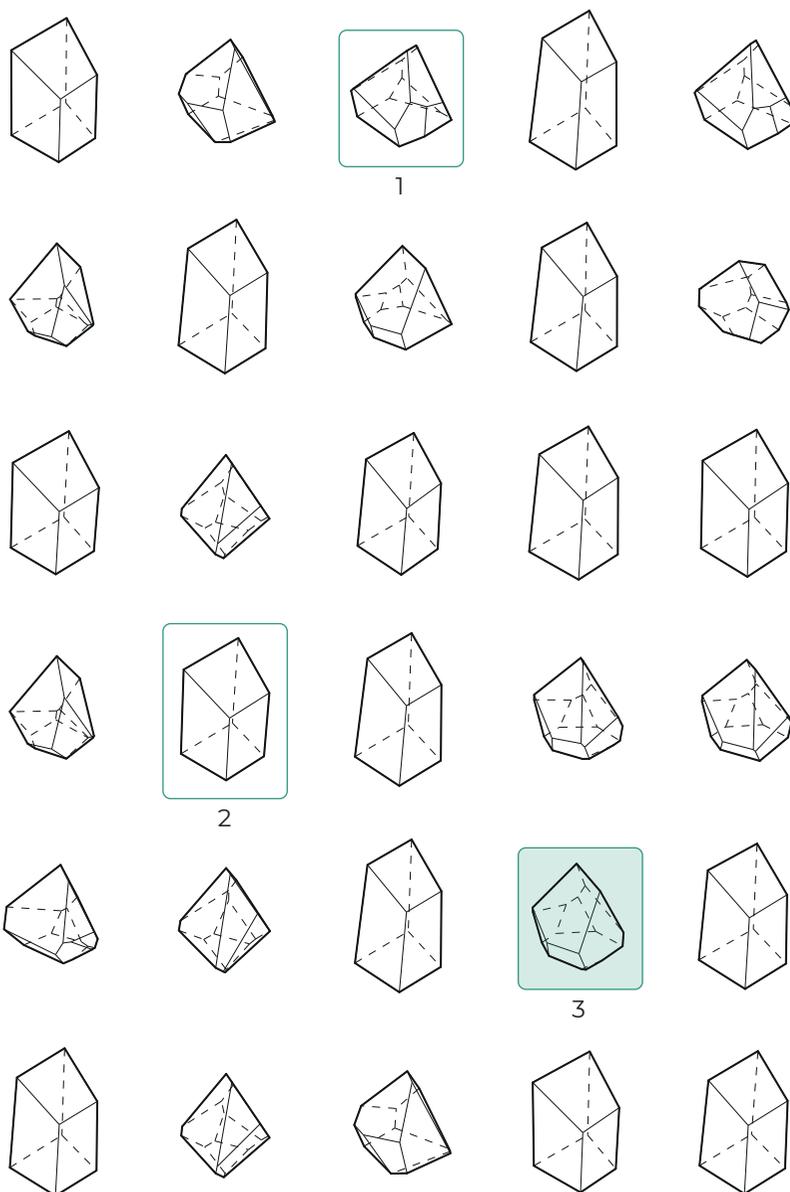
In una prima fase sono state esportate e confrontate fra di loro centinaia di geometrie. La loro visualizzazione è legata al fenotipo visibile utilizzando il componente Distribute to Grid. Unendo il Fitness Values, Data e Phenotypes di Wallacei X al componente, è possibile rendere graficamente i risultati in una griglia sul canvas di Rhinoceros, all'interno del quale sono disposte le forme e i valori dei fitness associati.

Non tutti i metodi risultano efficaci per qualsiasi tipo di problema soprattutto quando gli obiettivi da raggiungere aumentano. Nel nostro caso specifico, l'obiettivo legato alla dimensione dei lati doveva essere verificato altrimenti la geometria veniva subito scartata indipendentemente dagli altri fitness. Un altro obiettivo importante riguarda la dimensione della superficie di calpestio superiore a un valore prefissato di almeno 12 metri quadrati, un dimensionamento ridotto dell'area comporterebbe infatti una notevole riduzione dello spazio disponibile per le sedute e i tavoli necessarie al soddisfacimento dei bisogni degli utenti.

Insieme al Parallel Coordinate Plot (PCP) Settings, sono stati analizzati i risultati attraverso la selezione delle geometrie non dominate con l'uso del Pareto Front Solutions e delle geometrie presenti nell'ultima generazione. Selezionando le geometrie del Pareto Front, è stato possibile confrontare le soluzioni con quelle presenti nella generazione 99, verificandone la duplice presenza. Le forme presenti nell'ultima generazione sono state elaborate nel corso della simulazione, pertanto, la possibilità di ottenere geometrie ottimizzate rispetto ai fitness e alle proprietà dell'algoritmo di mantenere le soluzioni ottimali nel corso del calcolo (elitismo) è maggiore.

Fig. 45

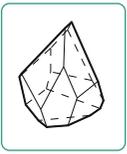
Generazione 99



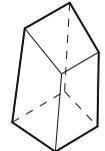
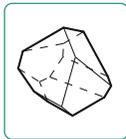
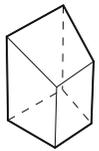
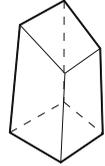
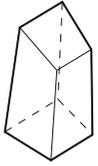
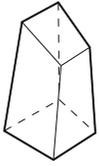
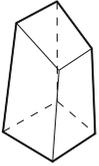
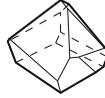
Fitness 1 (Lati corti)      Fitness 2 (Area utile)      Fitness 3 (Altezza)      Fitness 4 (Distanza centro)

1	20	13,39 mq	5,57 m	0,43 m
2	2	14,53 mq	8,5 m	2,49 m
3	2	13,23 mq	6,04 m	0,19 m

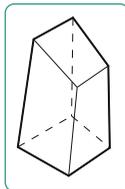
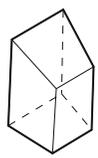
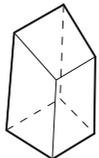
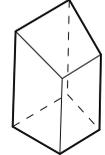
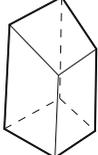
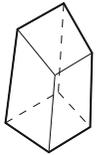
Fig. 45 Analisi di alcune geometrie ottimizzate nell'ultima generazione. Elaborato personale.



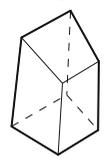
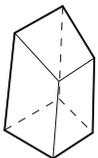
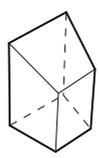
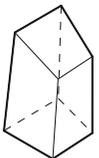
4



5



6



**Fitness 1**  
(Lati corti)

**Fitness 2**  
(Area utile)

**Fitness 3**  
(Altezza)

**Fitness 4**  
(Distanza centro)

4

2

11,71 mq

5,1 m

0,003 m

5

2

10,42 mq

4,55 m

0,0004 m

6

2

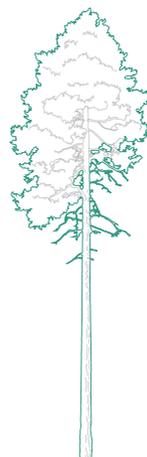
15,05 mq

7,97 m

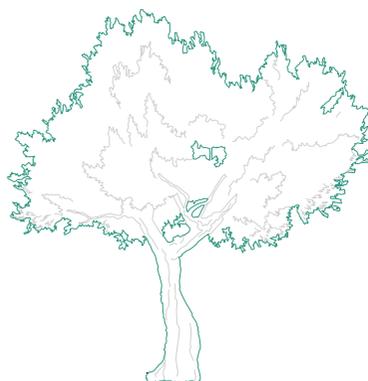
1,71 m

**Pino**

Il *Pinus sylvestris* è un albero sempreverde e longevo (fino a 500 anni) che può raggiungere i 40 metri di altezza. Il tronco dritto e scanalato culmina con una chioma irregolare. In condizioni boschive, i rami si sviluppano dopo i 2/3 dell'altezza del fusto.

**Ulivo**

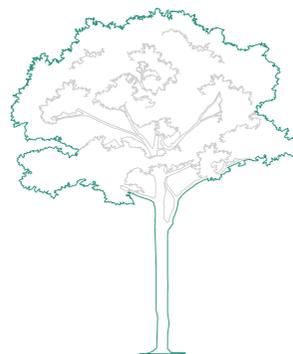
L'*Olea europea* è un albero sempreverde da frutto. Può diventare millenario e raggiungere i 15-20 metri di altezza. La chioma presenta una forma conica e il tronco, spesso e resistente, si dirama già a pochi metri da terra.

**Castagno**

Il *Castanea sativa* è una pianta molto longeva (oltre i 500 anni) che può raggiungere un'altezza superiore ai 30 metri. Presenta un tronco che può raggiungere un diametro di qualche metro, alto fino a 6 metri, e una chioma relativamente tondeggiante.

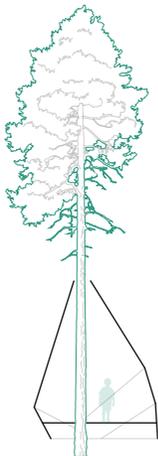
**Pioppo bianco selvatico**

Il *Populus alba* è una pianta longeva (fino a 100 anni) e resistente che può raggiungere i 30 metri di altezza. Presenta una chioma ampia e arrotondata e resiste bene alle esposizioni ventose.



**Fig. 46** Descrizione di alcune specie arboree e la relazione che la forma ha con essa. Elaborato personale.

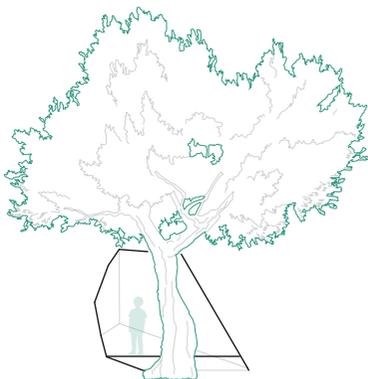
## Adattamento della forma alle specie arboree



### Pino

In rapporto al pino, la struttura tende a slanciarsi verso l'alto grazie alla parte di tronco libera dai rami. Le pareti risultano molto più ampie nella parte superiore e la superficie utile interna rispetta gli standard imposti, superiore ai 12 mq.

Le dimensioni del tronco permettono di controllare i parametri a piacere in modo da ottenere la miglior forma in rapporto all'albero.



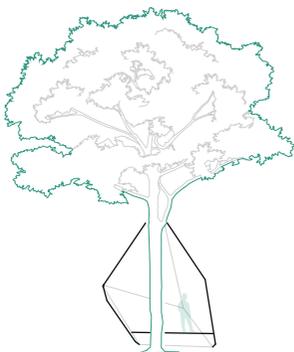
### Ulivo

La struttura intorno all'ulivo assume una forma particolarmente irregolare data l'inclinazione e lo spessore del tronco. Lo spazio, compreso di area utile, è difficilmente ottimizzabile nel rispetto degli standard imposti.



### Castagno

La forma ottenuta in rapporto al castagno risulta schiacciata e tondeggiante. Le superfici presentano dimensioni simili e l'area utile difficilmente soddisfa i requisiti, date le contenute dimensioni in altezza del tronco.



### Pioppo bianco selvatico

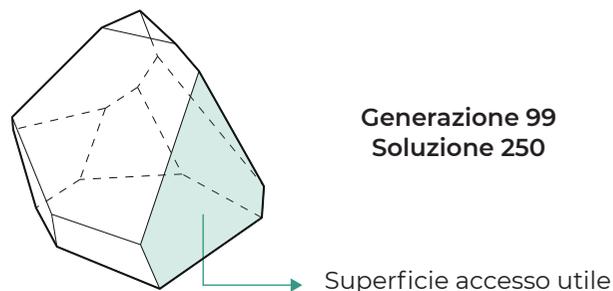
La struttura ricavata, in relazione al pioppo, assume una configurazione slanciata verso l'alto anche se contenuta. L'area utile rispetta i limiti imposti e le superfici risultano leggermente più ampie nella parte superiore rispetto a quelle inferiori.

L'albero assume un aspetto importante in questa fase decisionale, esso infatti rappresenta uno dei limiti entro il quale la geometria deve svilupparsi. La geometria di progetto scelta deve rapportarsi con la tipologia di albero e le sue proprietà formali uniche. Un albero con tronco basso comporta geometrie più tozze mentre una con tronco alto più slanciate. Anche l'inclinazione del fusto implica un limite formale entro il quale la geometria deve potersi associare.

Verificando parallelamente le soluzioni non è possibile definire con assoluta certezza quale sia la geometria migliore in quanto entrano in gioco diversi aspetti legati all'estetica personale e al bilanciamento degli obiettivi generati. E' importante menzionare il fatto che le soluzioni generate e analizzate sono poche rispetto alle infinite possibilità che si possono creare variando anche solo alcuni parametri dell'algoritmo. La geometria finale, scelta successivamente alle varie analisi, è la numero 250 all'interno della generazione 99.

Fig. 47

### Geometria scelta



Wallacei si è dimostrato uno strumento utile alla ricerca di una soluzione formale, dettata da specifiche azioni e decisioni sia per il calcolo che per lo sviluppo geometrico attraverso la definizione di uno script. Nonostante il software sia ancora in fase continua di sviluppo, gli strumenti proposti sono risultati più che soddisfacenti alle aspettative preposte. Wallacei vanta anche la presenza di una guida consultabile nella sezione Wallacei Primer, presente all'interno dell'interfaccia, e di una community composta dai creatori e da persone che sperimentano di continuo le possibilità che offre questo software. Il Wallacei Forum, sezione dedicata allo scambio di informazioni o a specifiche richieste della community, è

Fig. 47 Scelta della geometria di progetto nella generazione 99 attraverso la selezione di Wallacei. Elaborato personale.

anch'essa presente nell'interfaccia di Wallacei.  
Una volta ottenuta la geometria di progetto, si è passati alla definizione della pannellatura Voronoi per l'involucro esterno, come descritto precedentemente.

# 10

## Progetto: dettagli tecnologici ed elaborati grafici

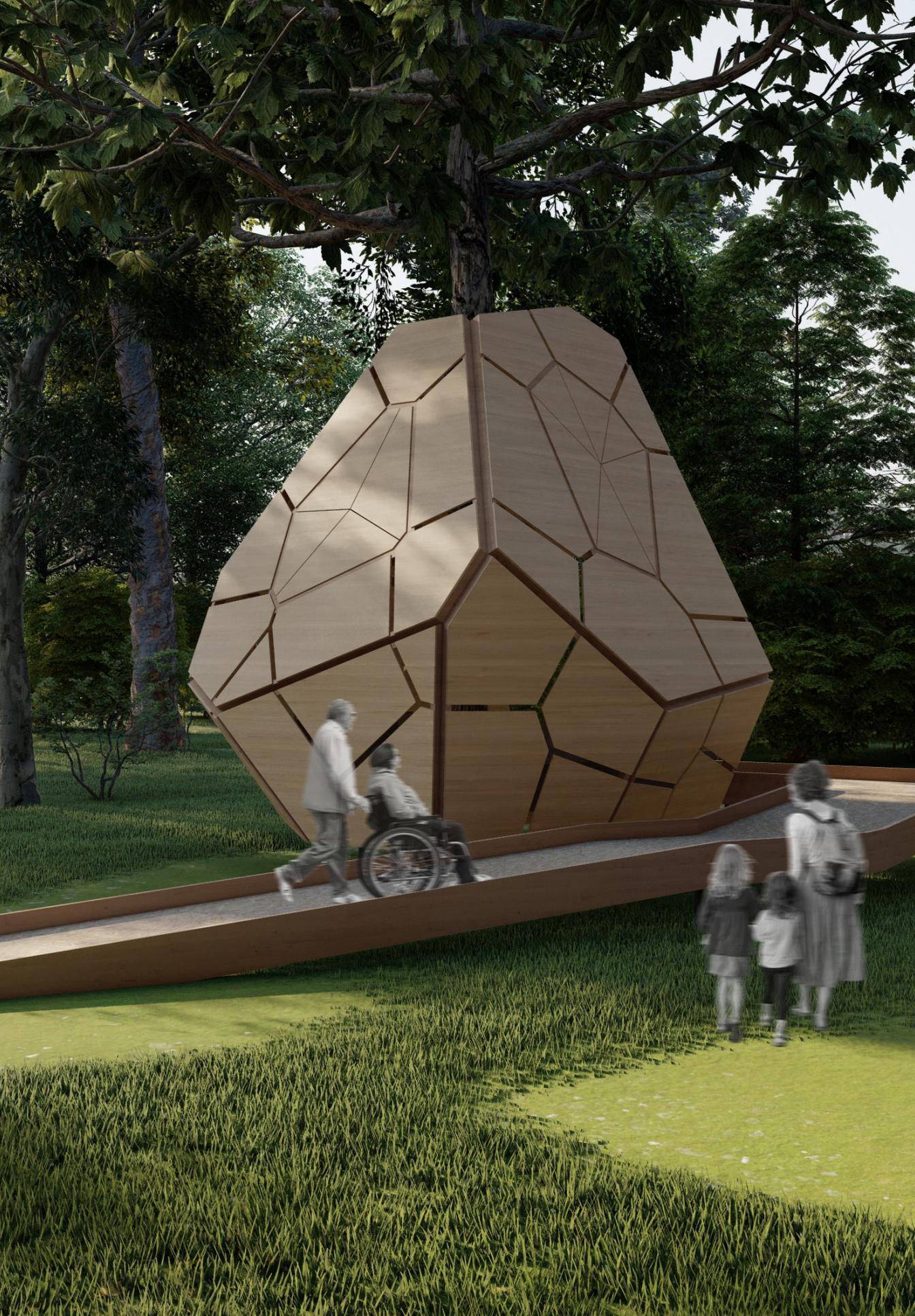
di

Riccardo Grecu e Mohamed Yasser Hariss

Il seguente capitolo illustra la proposta progettuale di un'architettura in simbiosi con l'albero e rappresenta il culmine del percorso di ricerca.

Gli elaborati grafici accompagnano la descrizione delle strategie progettuali adottate insieme alla produzione di modelli in scala: un plastico di studio realizzato tramite stampa 3D e una porzione dell'involucro realizzato in collaborazione con diverse figure professionali.

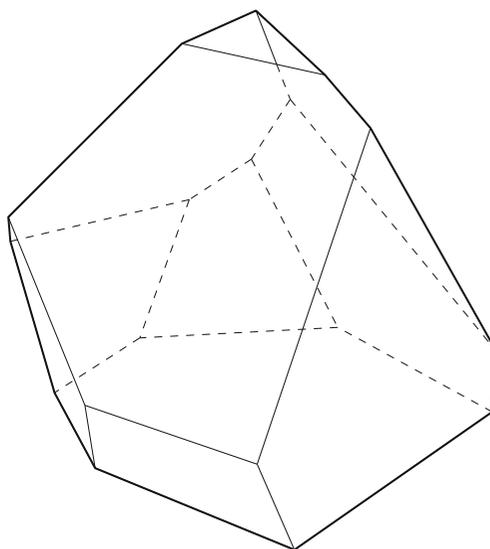
Render della geometria di progetto.



## 10.1 Geometria di progetto

La geometria ricavata rappresenta una delle forme ottimizzate dal software e analizzando i risultati è possibile notare come i valori siano prossimi agli obiettivi preposti ad eccezione dell'area utile che, per geometrie sfaccettate, non potrà mai raggiungere valori prossimi al target. Partendo dal volume ricavato è stata successivamente definita la tipologia strutturale.

Fig. 1



Generazione 99  
Soluzione 250

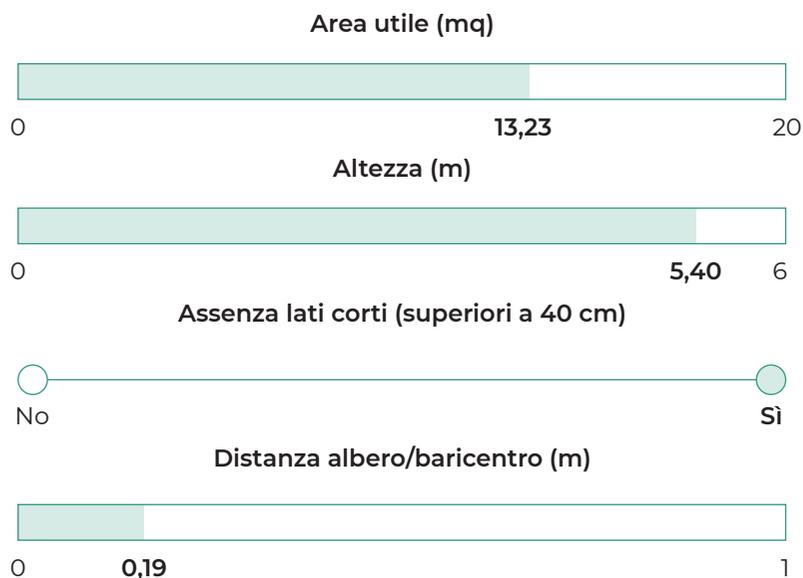
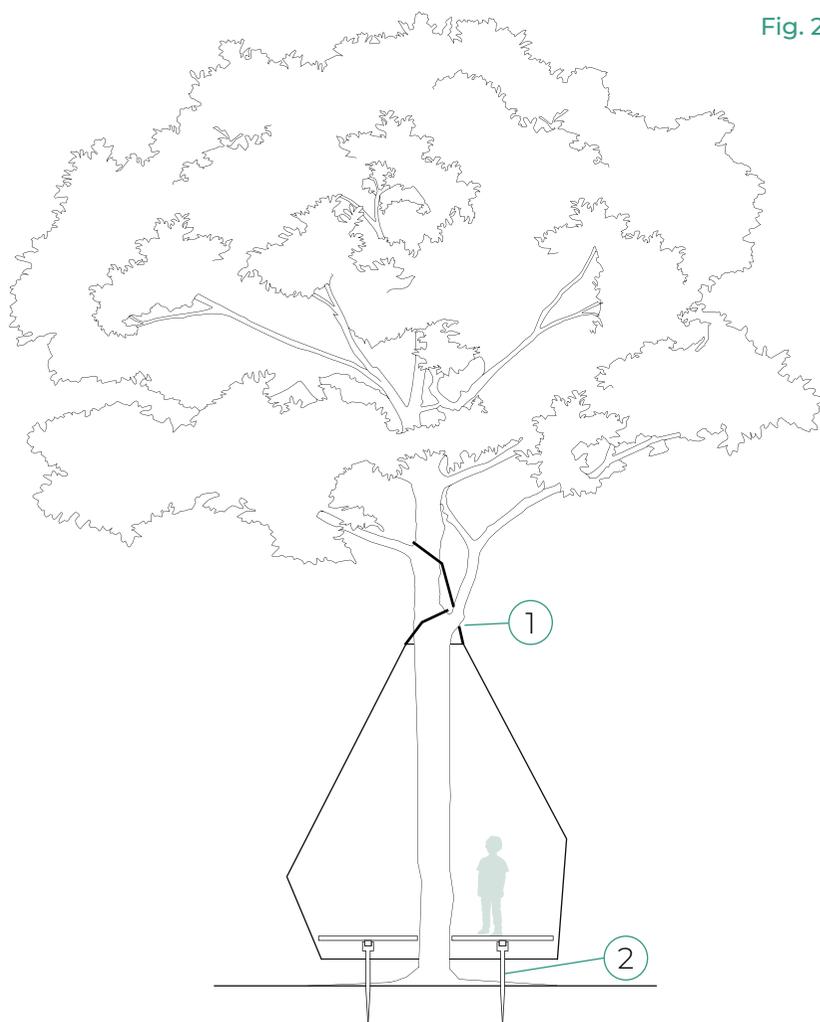


Fig. 1 Geometria di progetto scelta con i relativi obiettivi impostati durante il calcolo con Wallacei. Elaborato personale.

## 10.2 Sistema di supporto ed elaborati grafici

Fig. 2



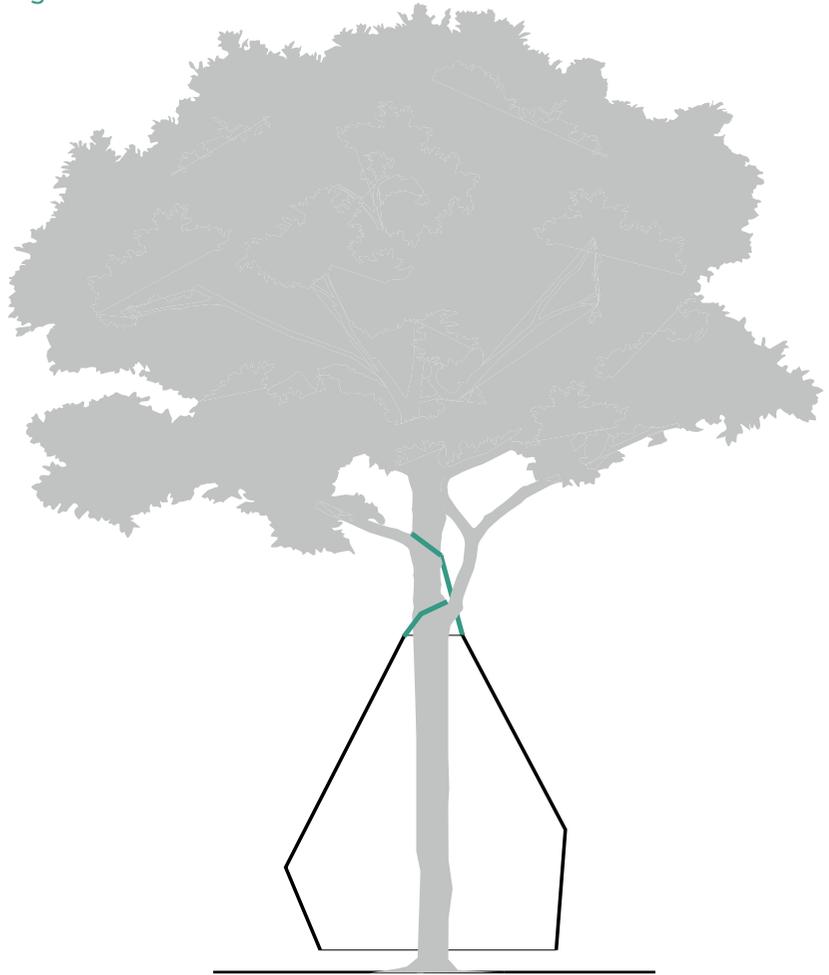
Il sistema di supporto strutturale del padiglione consiste in due parti: il primo è costituito da fasce imbottite, dette brache, che si appendono ai rami dell'albero per sostenere l'involucro. Il secondo, invece, implica l'utilizzo di elementi in acciaio che interrati consentono il sollevamento e sostegno della pedana di calpestio e rampa di accesso scaricando così il peso a terra.

La superficie di calpestio risulta quindi indipendente dall'involucro e presenta dei distanziali per evitare frizioni nei punti di contatto.

**Fig. 2** Schema relativo al supporto strutturale dell'involucro e del pavimento.  
Elaborato personale.

## 1. Supporto involucro

Fig. 3



Le fasce che sostengono l'involucro sono cinte in corrispondenza dei raccordi fra tronco e ramo individuati nella direzione opposta dell'attacco alla struttura. Questa strategia adottata non risulta invasiva per l'albero.

Fig. 4

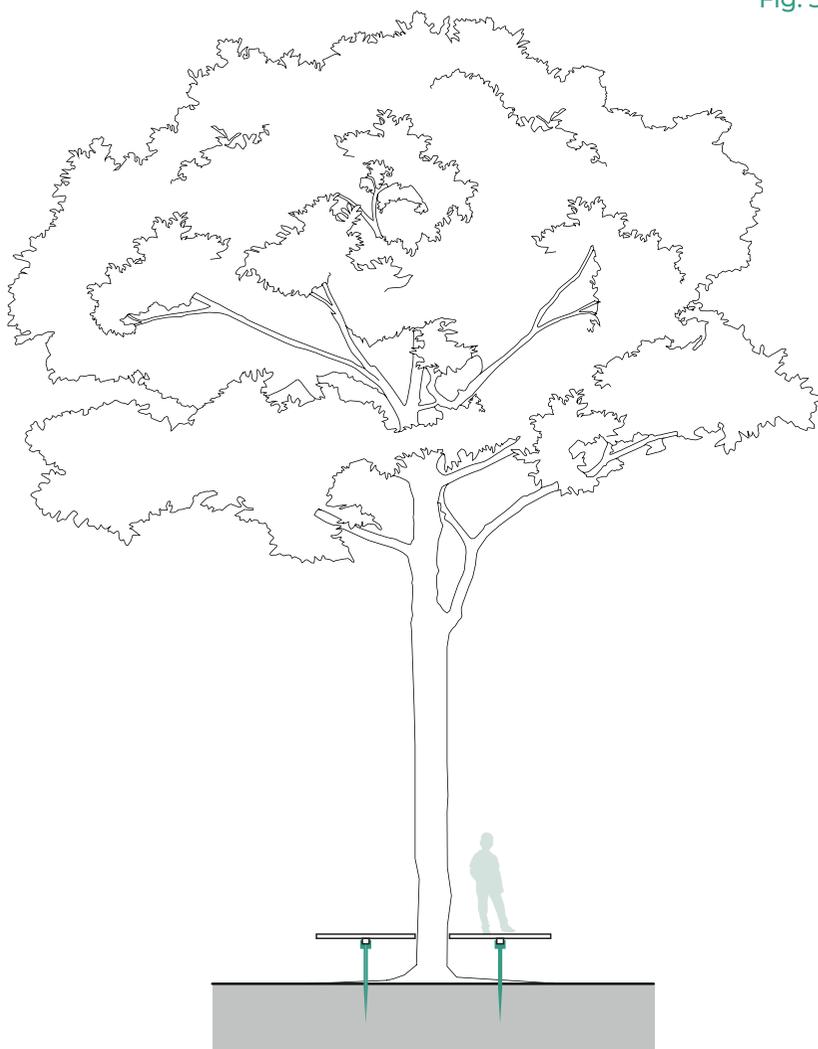


**Fig. 3** Schema di supporto dell'involucro. Elaborato personale.

**Fig. 4** Fascia imbottita (braca) con doppia asola.

## 2. Supporto pedana

Fig. 5



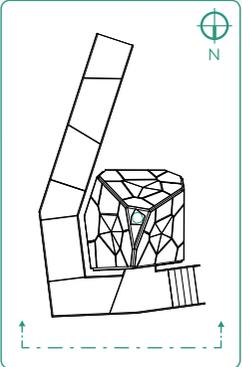
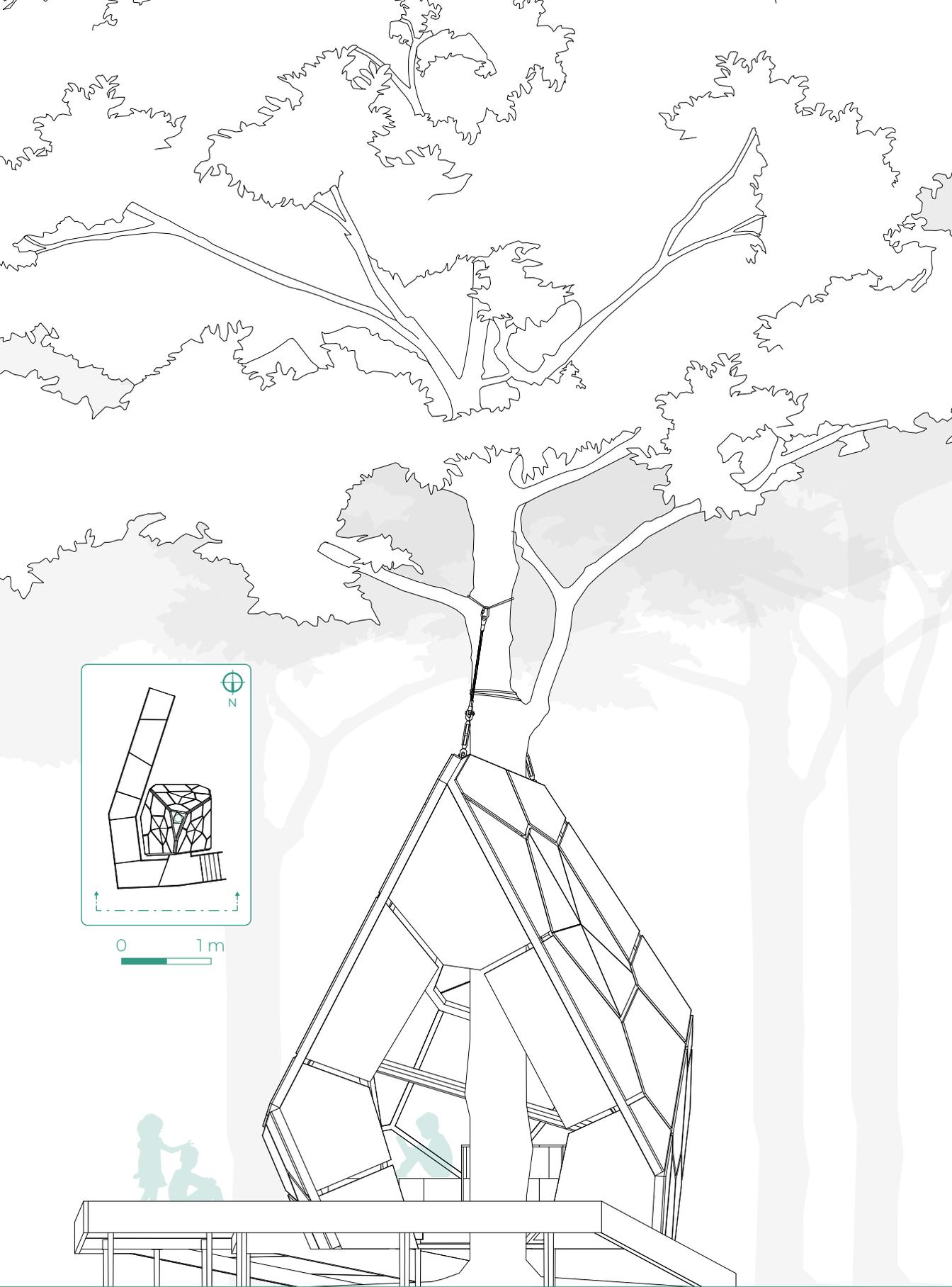
La passerella e il piano di calpestio sono supportati da viti di ancoraggio Krinner U-Fix, elementi in acciaio con sistema di aggancio a "U", impiantate nel terreno e collocate in modo da non interferire con lo sviluppo delle radici



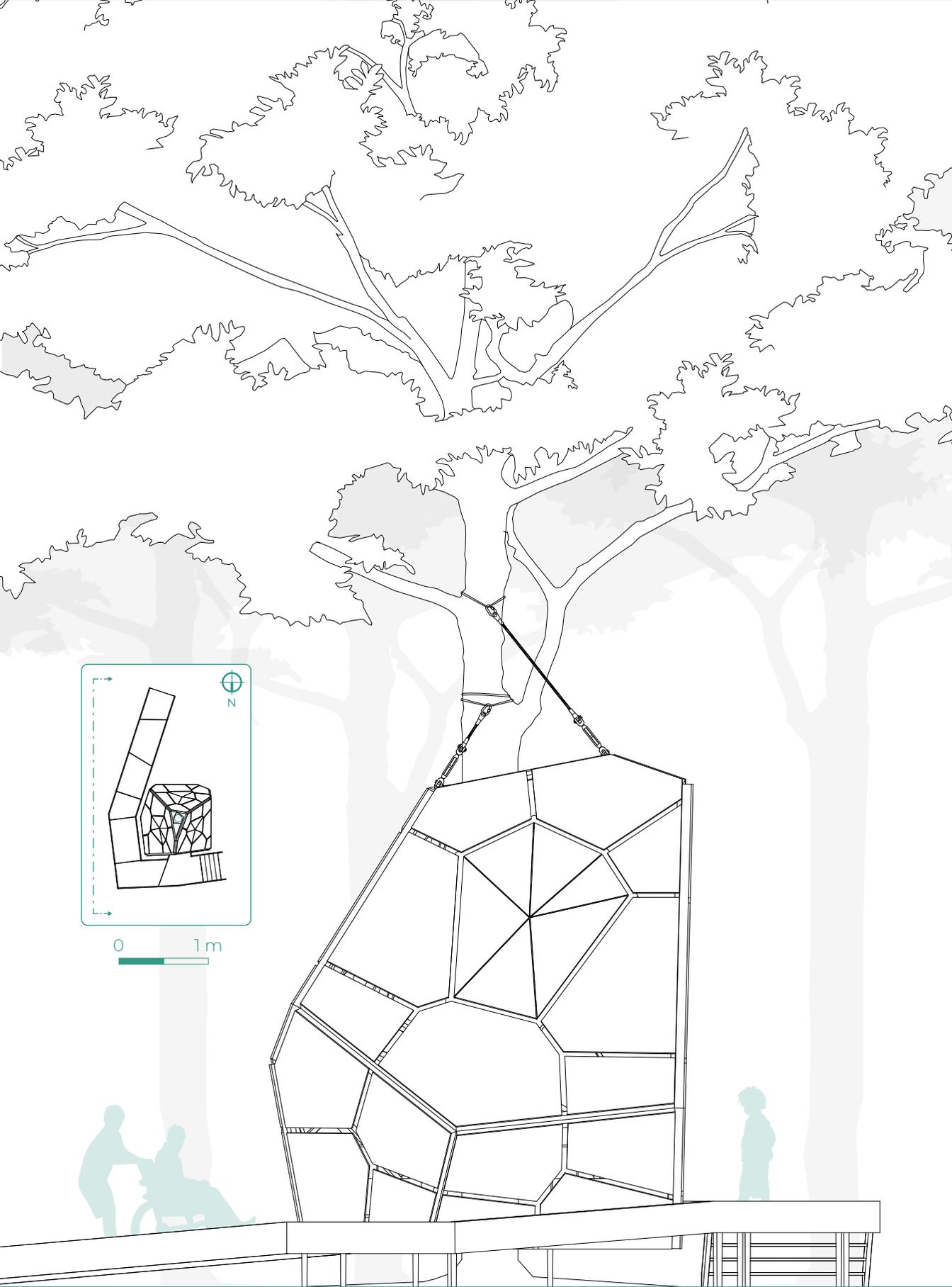
Fig. 6

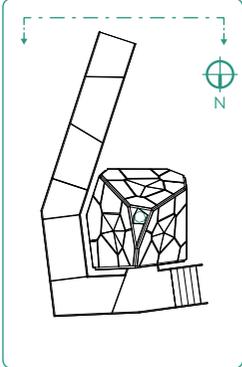
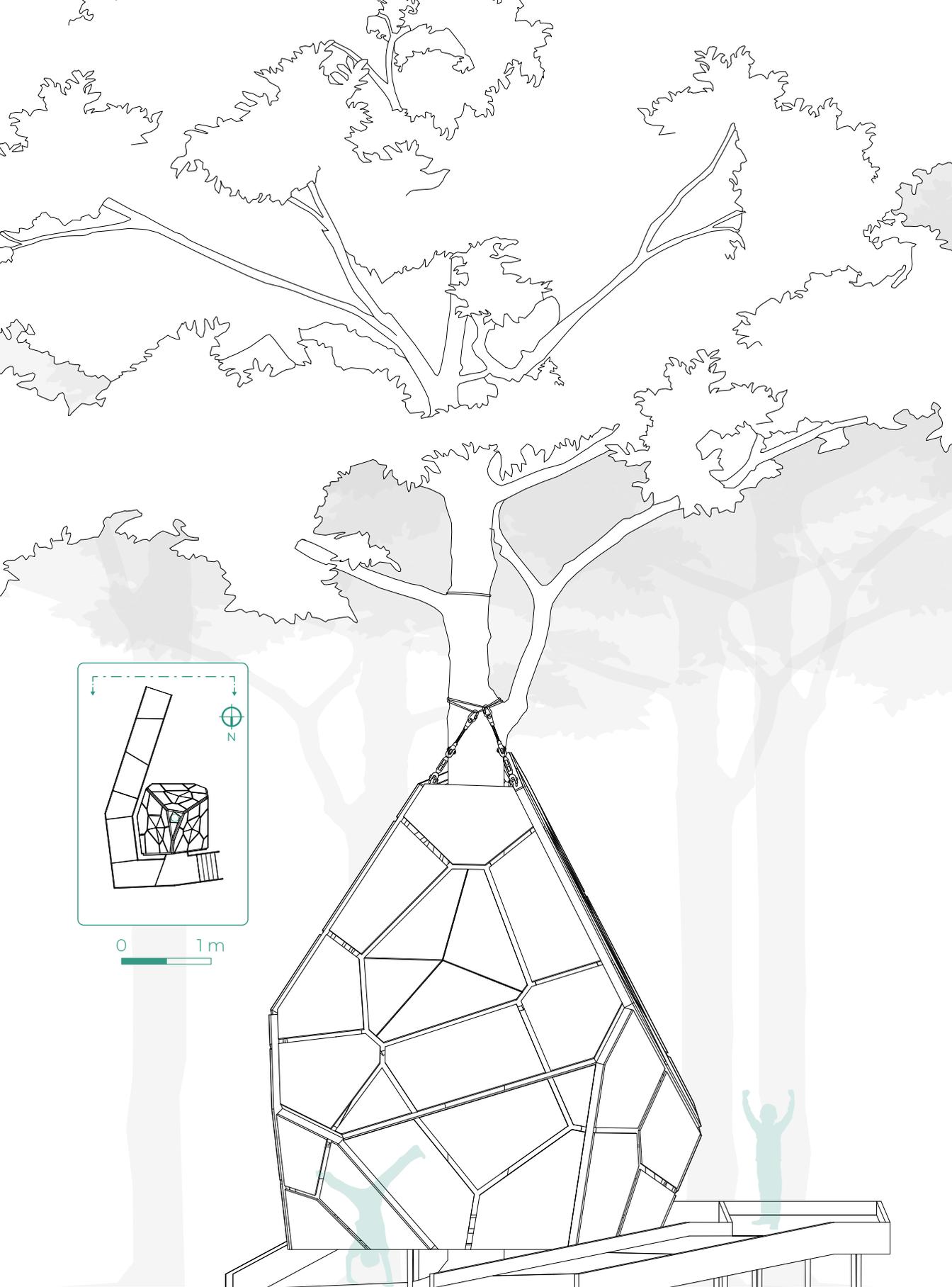
Fig. 5 Schema di supporto della pavimentazione. Elaborato personale.

Fig. 6 Vite di ancoraggio a terra.

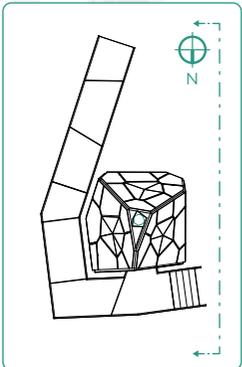
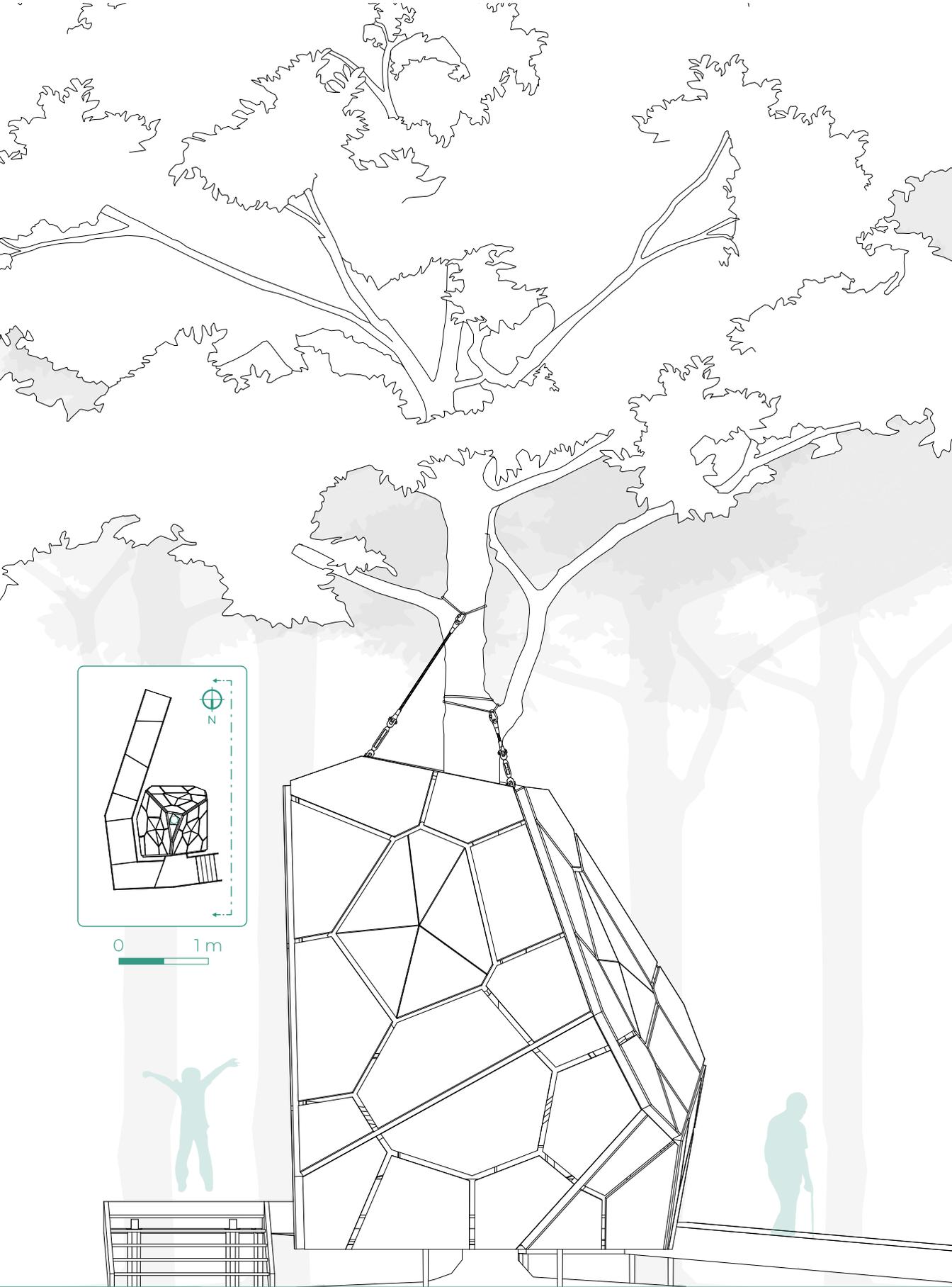


0 1m

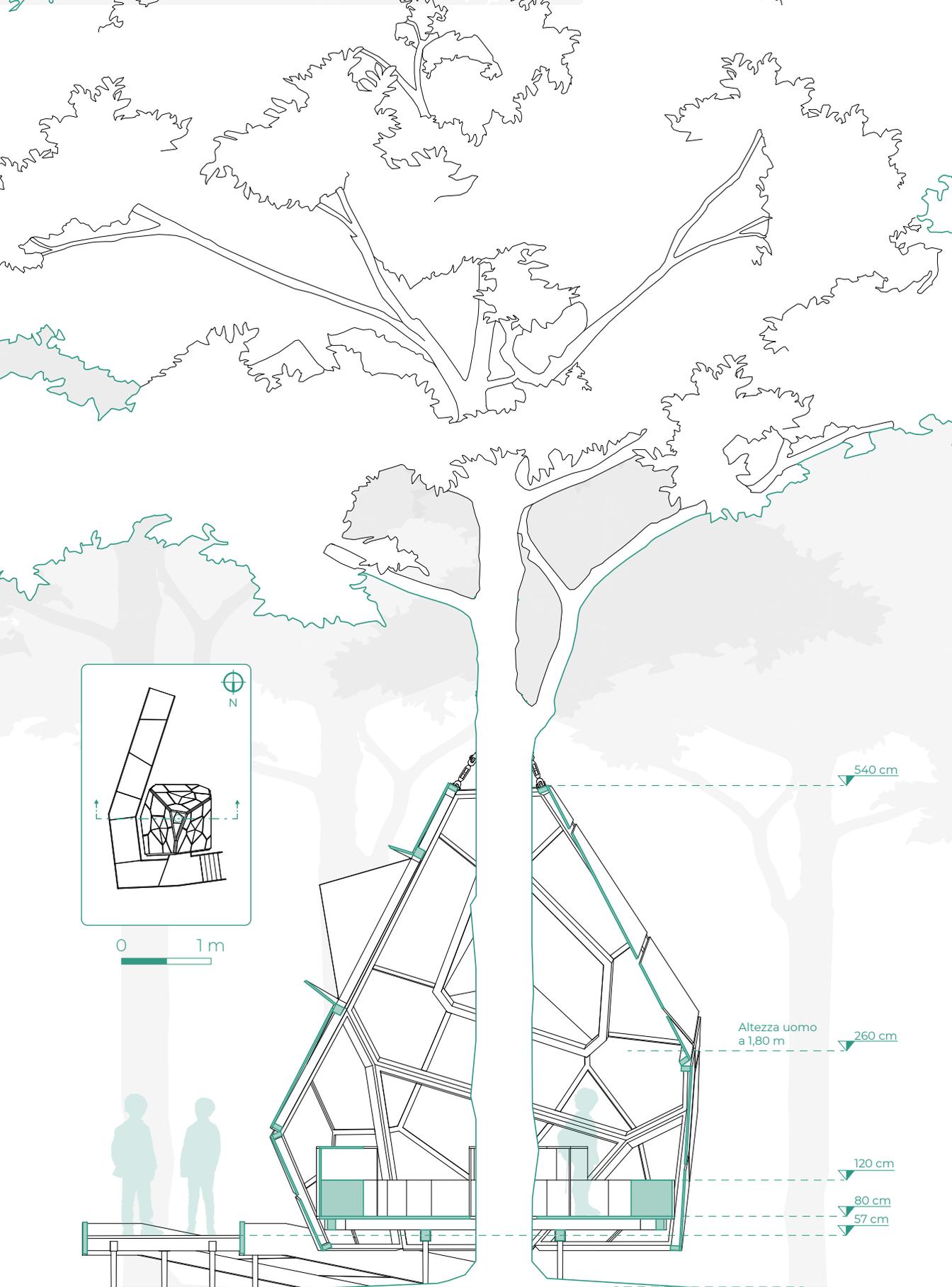




0 1m

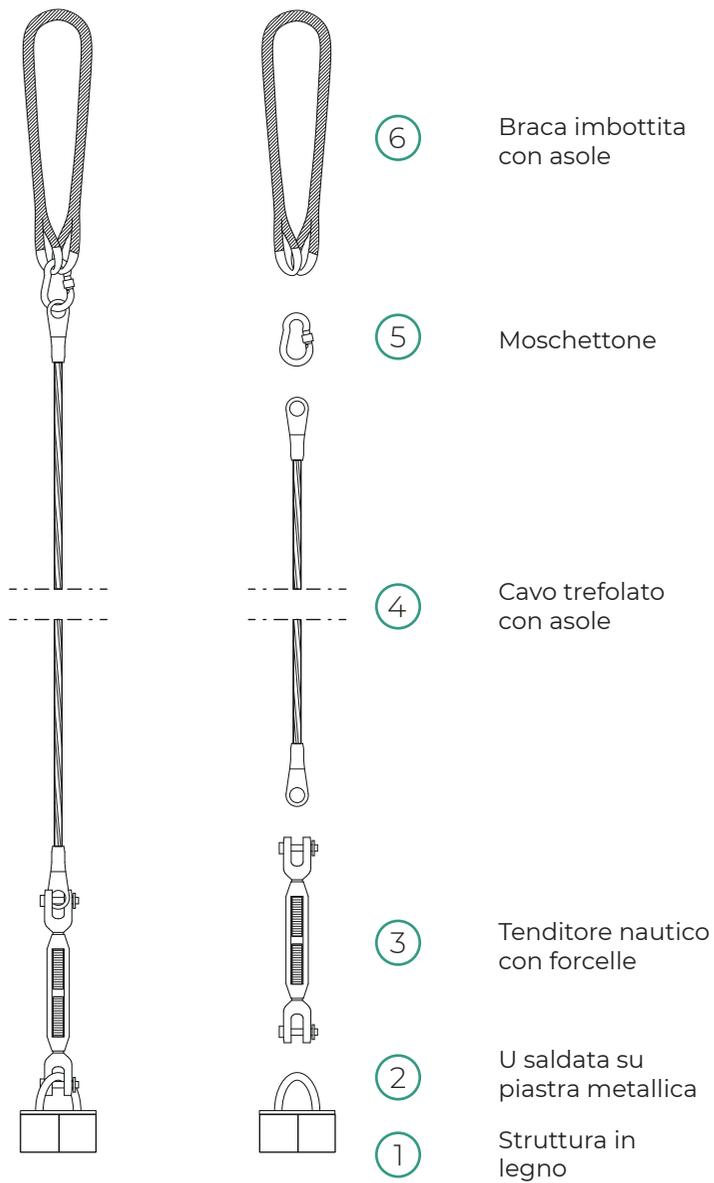


0 1m



## Sistema di ancoraggio all'albero

Fig. 7

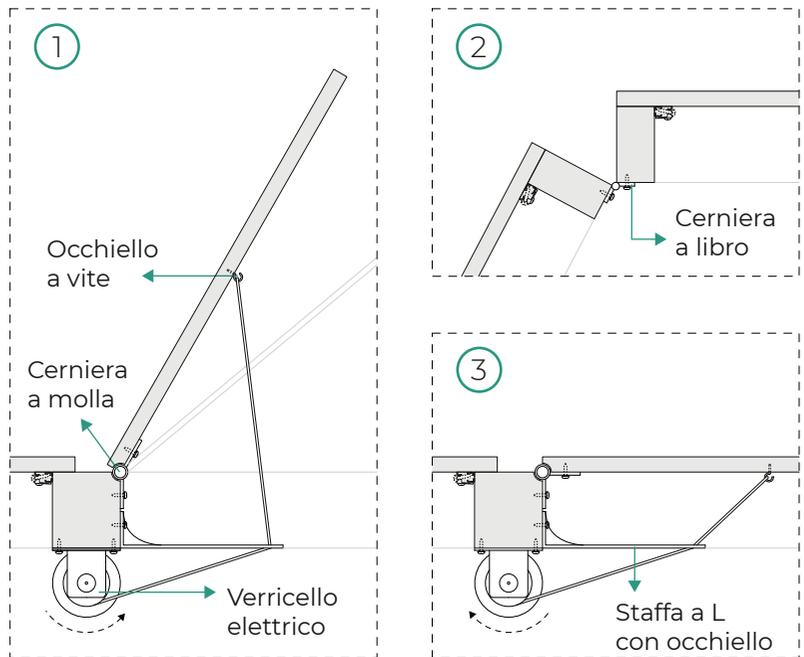
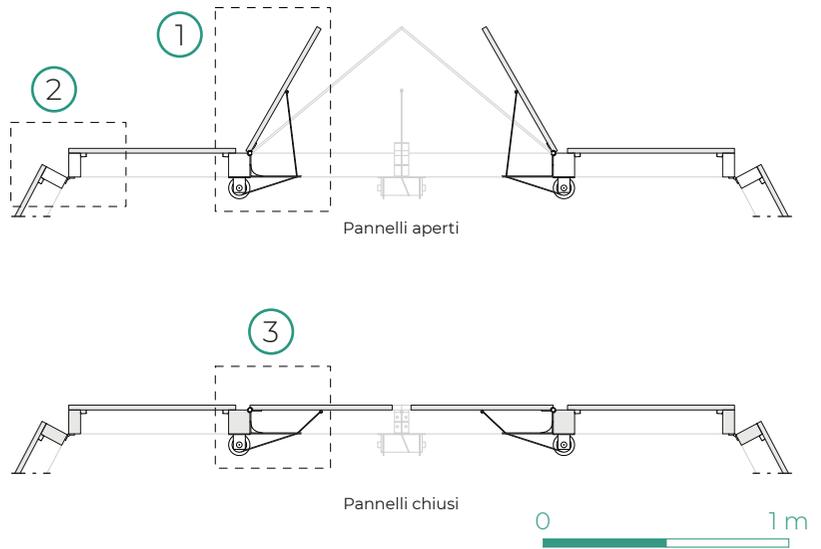


Scala 1:20

0 40 cm

**Fig. 7** Dettaglio tecnologico del sistema di supporto dell'involucro all'albero. Elaborato personale.

Fig. 8 **Meccanismo pannelli cinetici**



Dettagli in scala 1:10

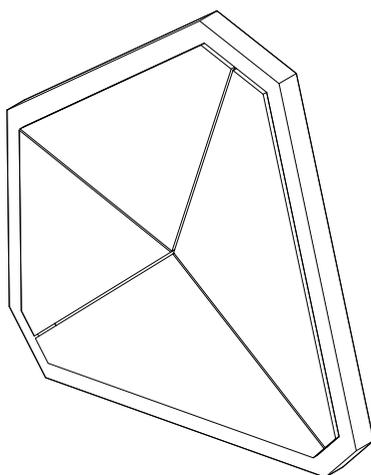
L'involucro del padiglione ha pannelli cinetici, elementi bio-ispirati all'apertura degli stomi e dei petali. Il funzionamento si basa sul principio di ritorno elastico grazie all'adozione di cerniere a molla, verricelli elettrici e corde. Tramite l'utilizzo di sensori di prossimità l'argano rilascia la corda consentendo l'apertura dei pannelli e aumentando la quantità di luce in ingresso. L'avvolgimento della corda permette invece la chiusura.

**Fig. 8** Dettaglio tecnologico del meccanismo cinetico dei pannelli tramite verricello elettrico. Elaborato personale.

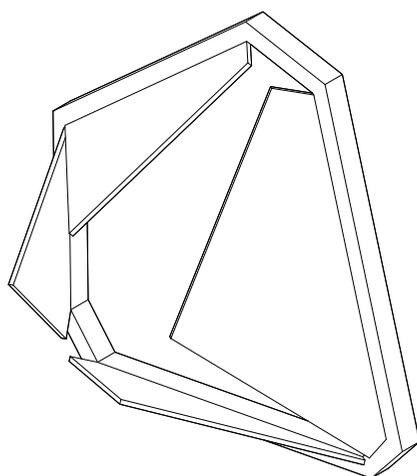
## Apertura pannelli cinetici

Fig. 9

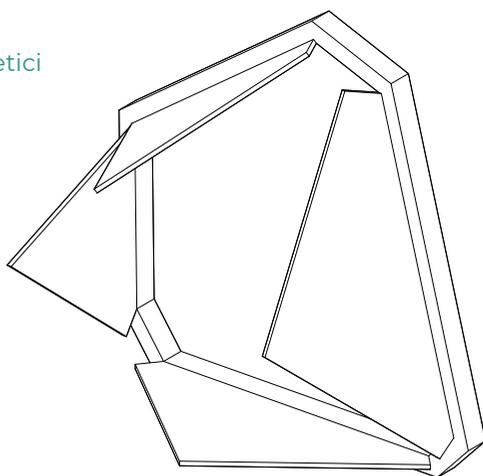
Pannelli cinetici  
chiusi



Pannelli cinetici  
aperti a 60°



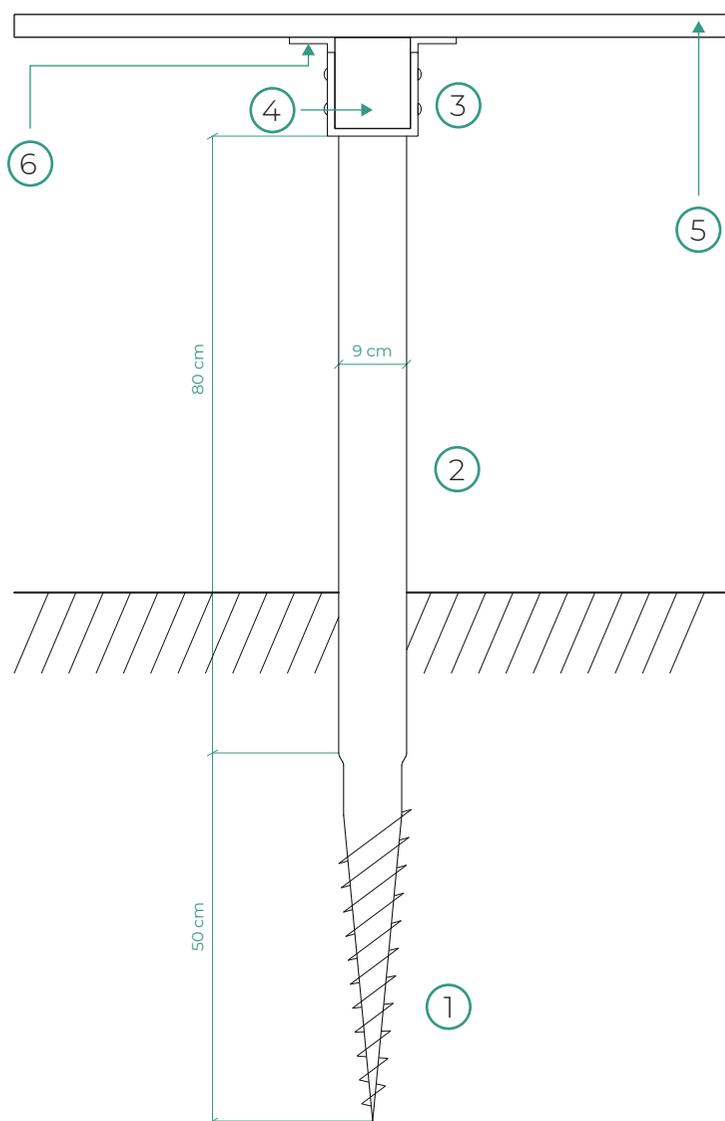
Pannelli cinetici  
aperti a 80°



**Fig. 9** Configurazione  
dei pannelli cinetici in 3  
diversi stadi.  
Elaborato personale.

Fig. 10

## Sistema di fissaggio a terra

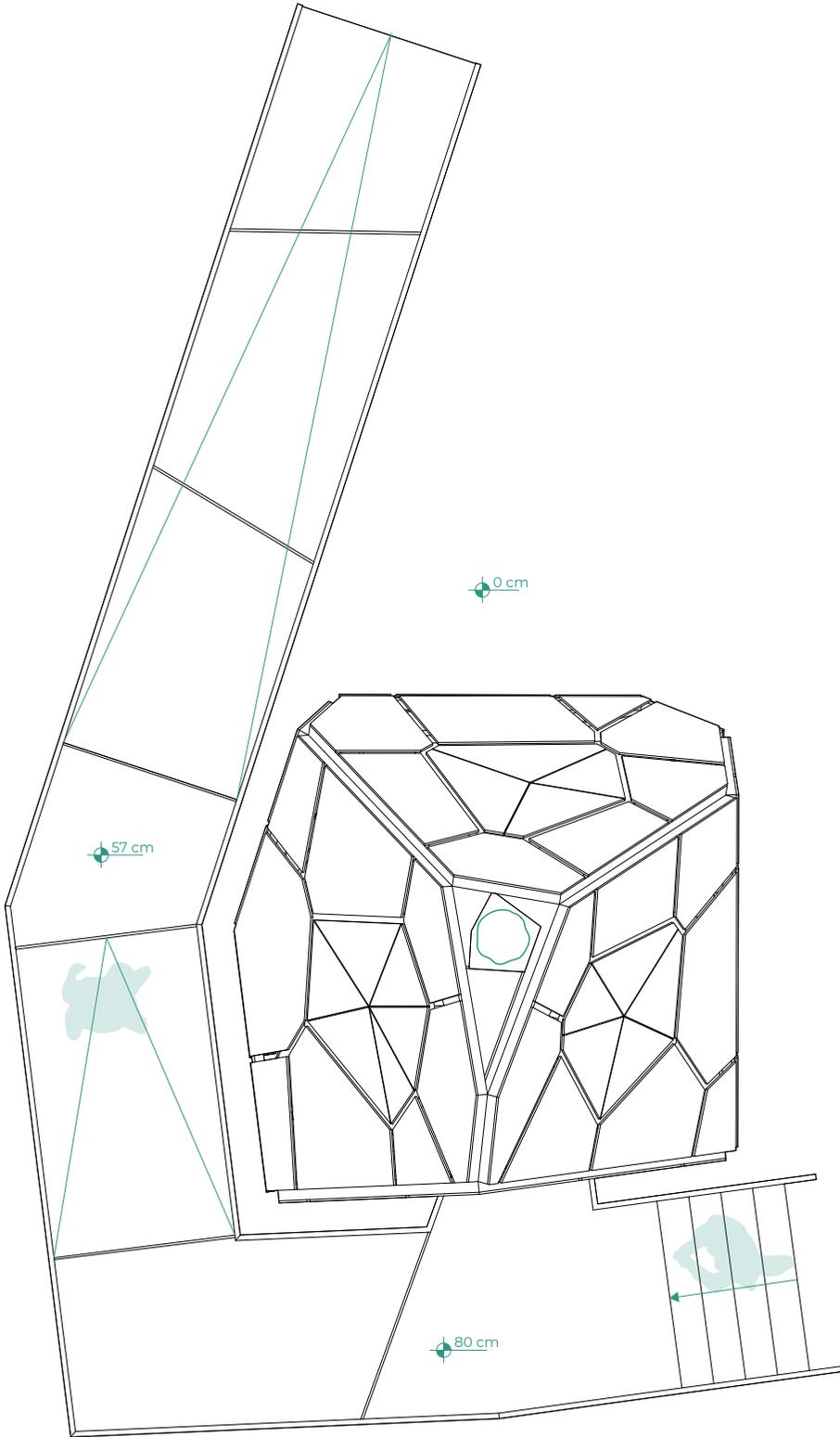


Scala 1:10

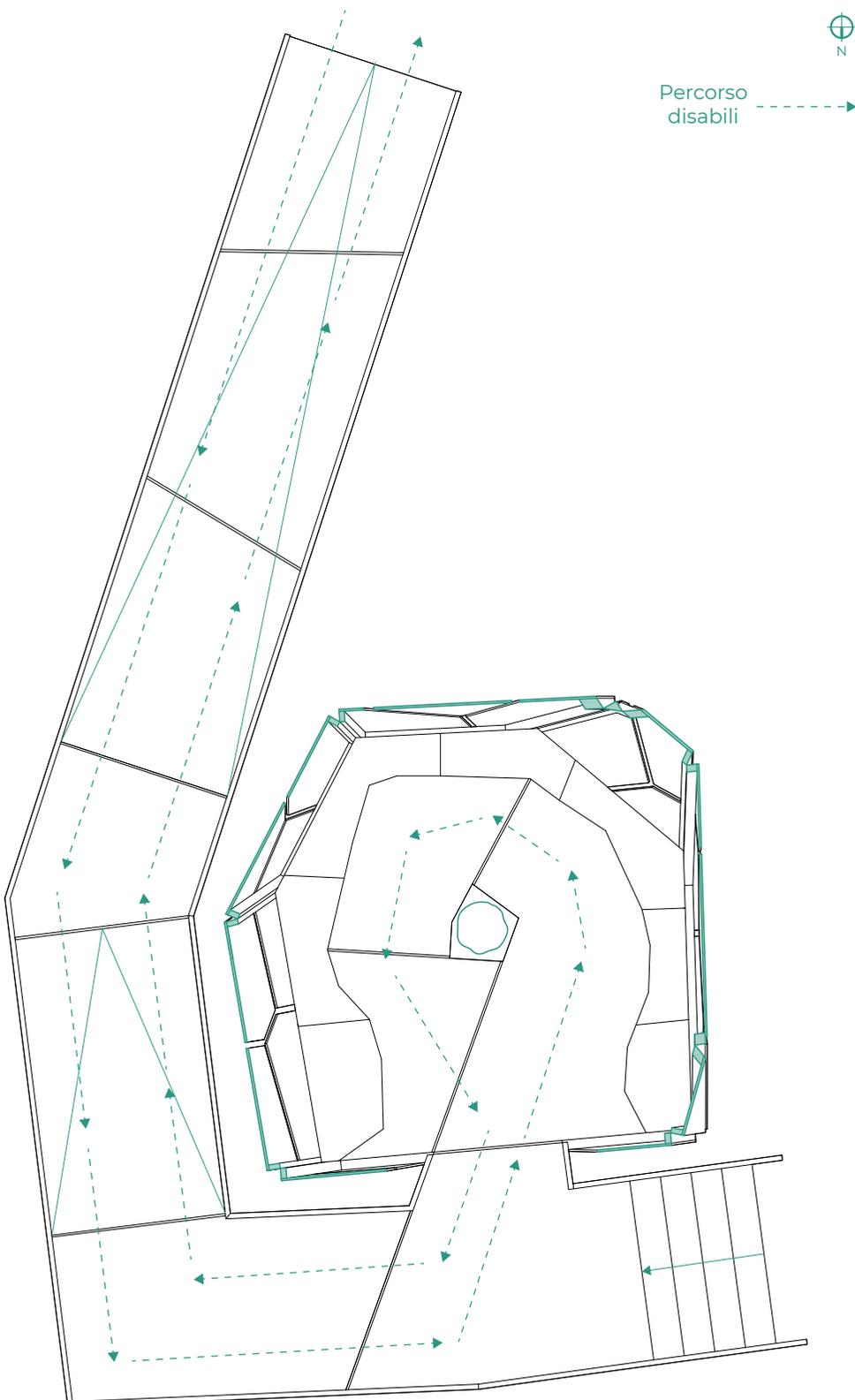
0 20 cm

- |   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| ① | Filettatura di ancoraggio a terra               | ④ | Trave in legno 10x12 cm                         |
| ② | Manicotto                                       | ⑤ | Pavimentazione in legno                         |
| ③ | Profilo a U saldato fissato con viti alla trave | ⑥ | Profilo a L di ancoraggio fra trave e pavimento |

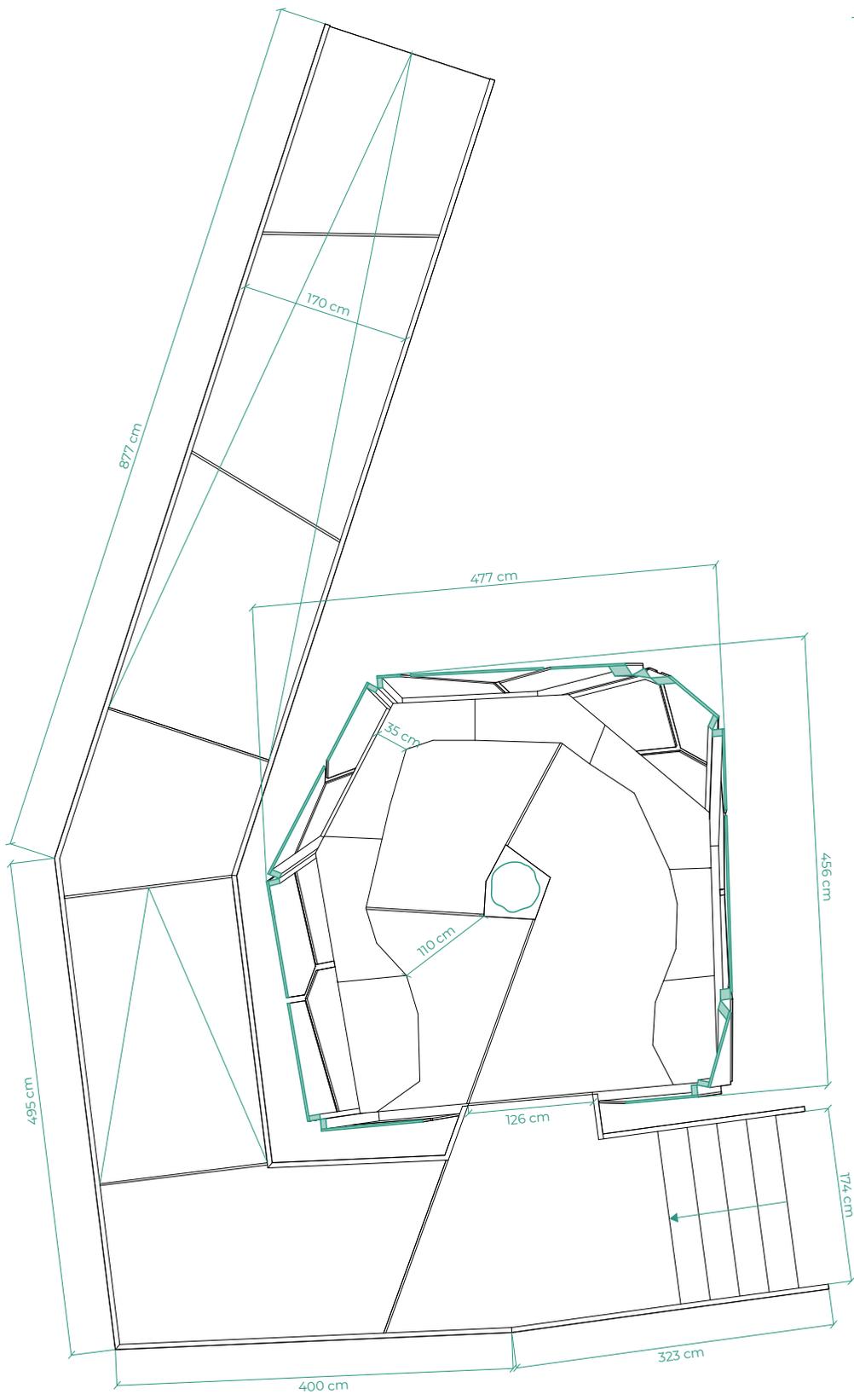
**Fig. 10** Dettaglio tecnologico del sistema di supporto a terra della pavimentazione. Elaborato personale.



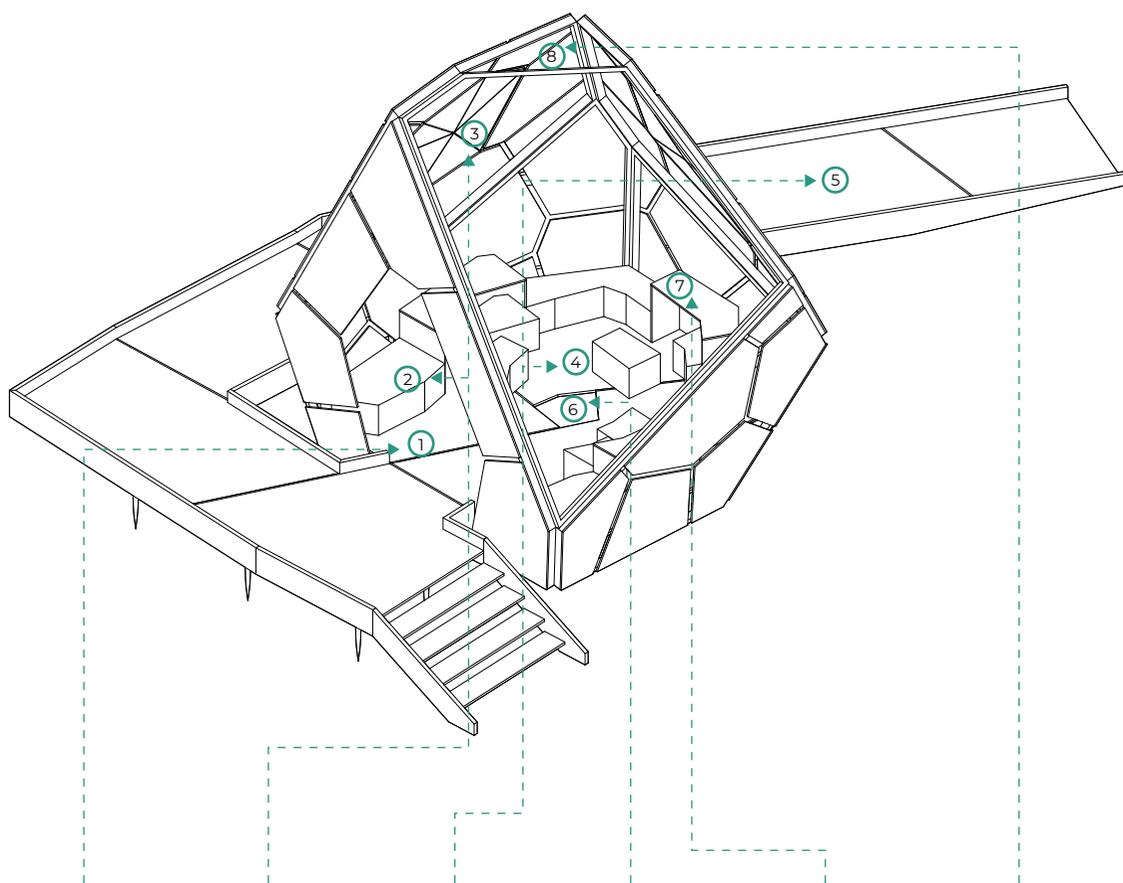
0 1 m



0 1 m



## Requisiti architettonici nel progetto



Docente

① Ambiente attrezzato per la didattica e la sicurezza dei bambini.



Bambini

② Sedute e piani di appoggio.  
③ Legame con il paesaggio tramite fughe, pannelli cinetici e albero.



Disabili

④ Fruizione degli spazi per persone con disabilità. Larghezza minima di 110 cm.  
⑤ Accessibilità tramite rampa con larghezza maggiore di 150 cm per il passaggio di due carrozzine.



Visitatori esterni

⑥ Valorizzazione della natura con l'albero centrale e permeabilità della struttura sul paesaggio circostante



Smart worker

⑦ Presenza di piani d'appoggio per apparecchi elettronici

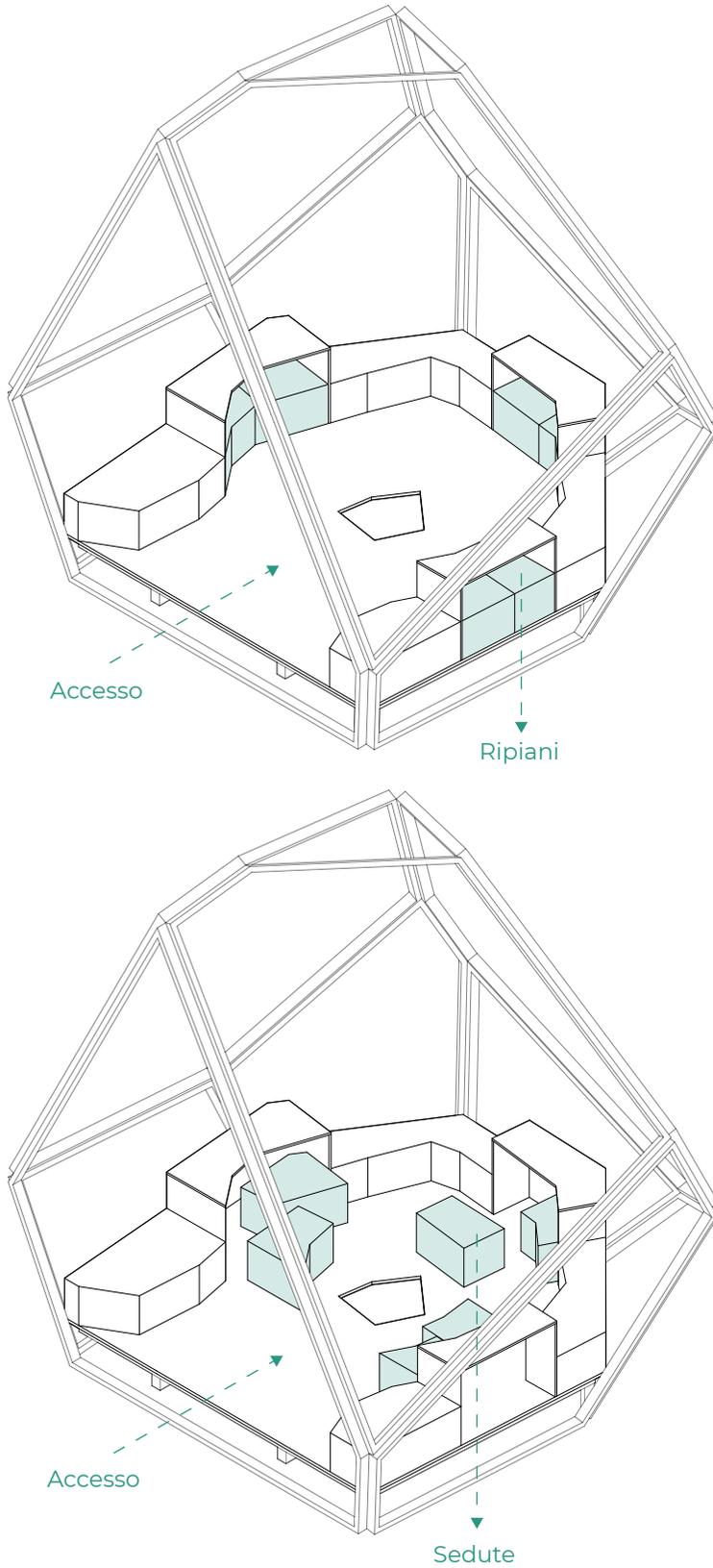


Addetti alla manutenzione

⑧ Sicurezza nel montaggio e smontaggio nel rispetto delle condizioni ambientali del sito

## Schema sedute interne

Fig. 11



**Fig. 11** Modello assonometrico raffigurante le sedute estraibili. Elaborato personale.

Fig. 12

### Schema Strutturale di una facciata

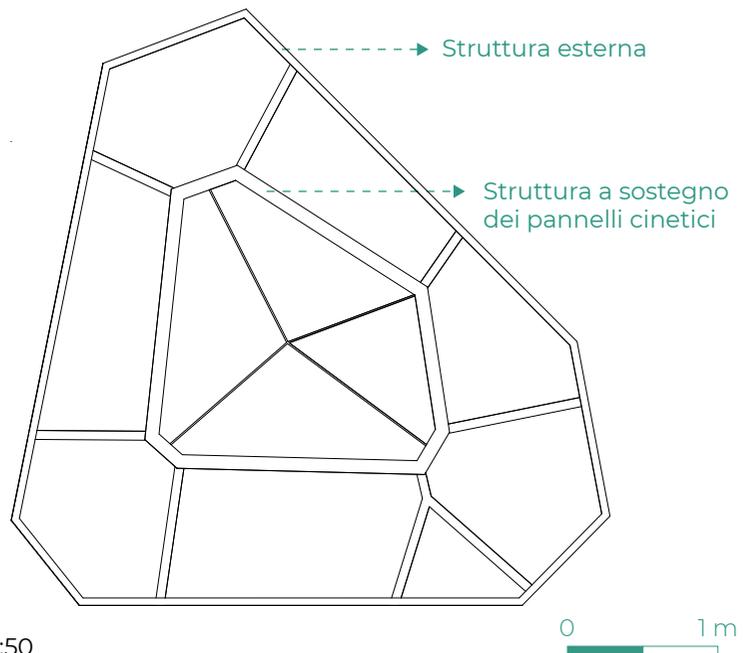
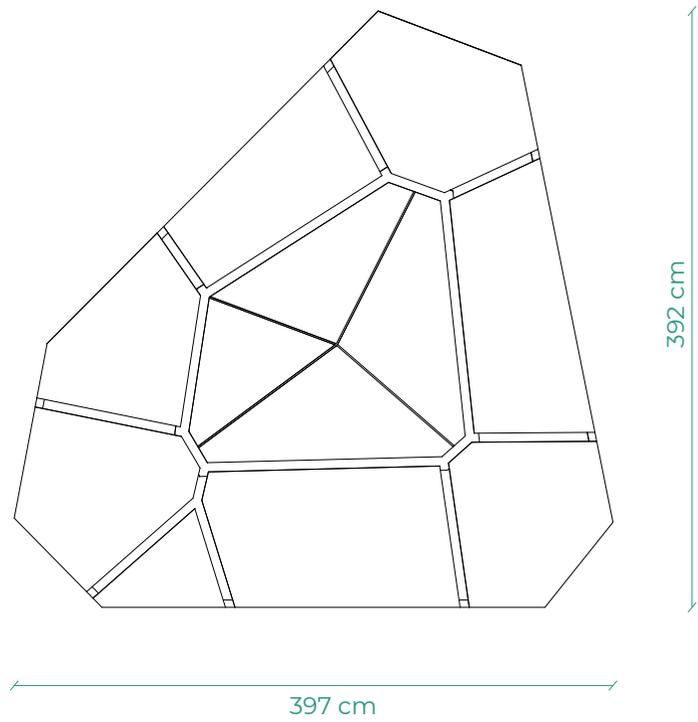
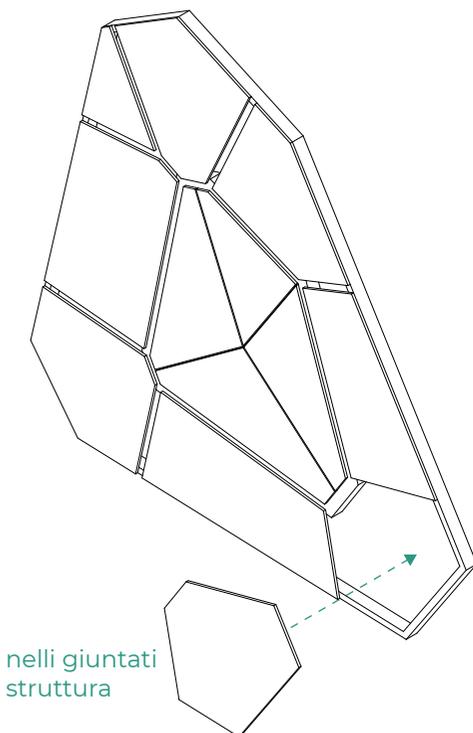
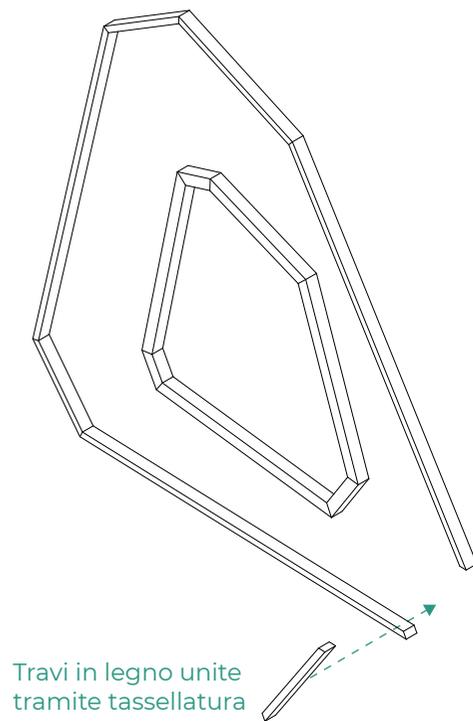


Fig. 12 Schema strutturale di una delle facce avente il pannello cinetico. Elaborato personale.

Scala 1:50

## Assemblaggio struttura

Fig. 13



**Fig. 13** Fasi di assemblaggio della struttura e dei pannelli. Elaborato personale.

## 10.3 Impatto ambientale dei materiali

In Architettura la sostenibilità, legata all'intero ciclo di vita di un manufatto, è tutelato da specifiche norme atte a ridurre l'impatto ambientale delle materie prime utilizzate e le sue successive lavorazioni. Uno degli obiettivi è quello di mostrare alcuni strumenti utili ai progettisti al fine di progettare attraverso scelte sostenibili.<sup>1</sup>

L'analisi riferita al nostro progetto non intende rappresentare uno studio completo nelle varie fasi del ciclo di vita ma una ricerca preliminare sulle scelte dei materiali utilizzati e le relative valutazioni sugli impatti ambientali.

### LCA

Il Life Cycle Assessment (LCA) è una metodologia volta alla quantificazione degli impatti ambientali di un prodotto o di un servizio durante il suo intero ciclo di vita. L'analisi LCA prende in considerazione tutti i passaggi che portano dall'estrazione delle materie prime attraverso la fabbricazione, la distribuzione e l'uso fino allo smaltimento finale. Può inoltre misurare gli impatti di un edificio nel corso della sua vita e, allo stesso tempo, quantificare l'impatto di un singolo materiale presente nell'edificio.<sup>2</sup>

La metodologia LCA è regolamentata dalle norme **UNI EN ISO 14040** e **14044** a livello internazionale e la valutazione degli impatti ambientali comprendono:

- L'estrazione e il trattamento delle materie prime
- La fabbricazione
- Il trasporto
- La distribuzione
- L'uso, il riuso e il riciclo
- Lo smaltimento finale<sup>3</sup>

Le fasi con le quali viene strutturato lo studio del Life Cycle Assessment sono riportate nel seguente schema e includono:

- **Definizione scopi e obiettivi:** definizione dei confini del sistema e il livello di approfondimento.
- **Analisi dell'inventario:** annotazione dei bilanci di massa e di energia dei materiali secondo i confini precedentemente prefissati, in riferimento all'unità

<sup>1</sup> Francesca Thiébat, *Progettazione sostenibile nel ciclo di vita* in «TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment», vol 5, 2013, pp. 177-179.

<sup>2</sup> Rete clima, <https://www.reteclima.it>, (consultato Giugno 2021).

<sup>3</sup> CSQA, <https://www.csqa.it>, (consultato Giugno 2021).

funzionale scelta.

- **Valutazione degli impatti:** riassunto e quantificazione dei valori di impatto ambientale calcolati nell'Analisi dell'inventario.

- **Interpretazione e miglioramento:** analisi dei risultati ottenuti attraverso la loro spiegazione e significato.<sup>4</sup>

### Metodologia LCA

Fig. 14



Una volta individuati gli estremi del sistema si passa al calcolo degli impatti ambientali. I calcoli relativi a questa metodologia restituiscono i valori di impatto ambientale secondo diverse categorie, sono pertanto molteplici le dimensioni entro le quali agisce la LCA. Il calcolo delle emissioni di anidride carbonica ad effetto serra è uno dei tanti, può anche valutare gli impatti sull'emissione di altri gas nocivi, sulla salute umana e molti altri.

Nel settore delle costruzioni, condurre una LCA significa fornire una serie di benefici tangibili di riduzione dell'impatto ambientale in quanto è possibile:

- Valutare le opzioni analizzate e scegliere conseguentemente la soluzione meno impattante
- Confrontare gli impatti dovuti alla ristrutturazione, demolizione o ricostruzione
- Identificare gli elementi di un fabbricato con maggior impatto e agire su di essi
- Calcolare l'impatto del ciclo di vita di un materiale al fine di scegliere quello più sostenibile<sup>5</sup>

L'analisi LCA è fondamentale per l'ottenimento di certificazioni quali EPD (Dichiarazione Ambientale di Prodotto) e per il calcolo del Carbon Footprint, o Embodied Carbon, di un materiale.

<sup>4</sup> Francesca Thiébat, *Life Cycle Design: An Experimental Tool for Designers*, Springer International Publishing, 2019, pp. 33-34.

**Fig. 14** Schema sulla metodologia del Life Cycle Assessment in <https://www.reteclima.it>.

<sup>5</sup> One Click LCA, <https://www.oneclicklca.com>, (consultato Giugno 2021).

Le analisi svolte per il progetto in questione prendono in considerazione i valori di Embodied Carbon ed Embodied Energy dei materiali da costruzione facendo una comparazione tra diverse tipologie di legno per elemento strutturale. I valori fanno riferimento alle prime fasi di estrazione del materiale, al loro trasporto e alla lavorazione (dalla culla al cancello).

Con Embodied Carbon (CO<sub>2</sub>/Kg) si identifica la quantità di gas ad effetto serra che viene rilasciata durante la fase presa in esame mentre per Embodied Energy(MJ/Kg), in riferimento alla medesima fase, si intende la quantità di energia primaria impiegata, sia rinnovabile che non rinnovabile.<sup>6-7</sup> I valori considerati fanno riferimento ai singoli materiali presi in esame al fine di individuare quello meno impattante e, tramite successive analisi, verificare se opportuno per il tipo di elemento considerato.

Le parti che compongono il volume di progetto sono:

- Elementi strutturali di sostegno dei pannelli e del tavolato di calpestio
- Pannelli
- Superficie di calpestio compresa di rampa

Per ognuna sono state confrontate due/tre tipologie di legno estrapolando i dati dalle certificazioni EPD delle aziende produttrici.

**Fig. 15 Selezione materiali**



<sup>6</sup> Carbon Cure, <https://www.carboncure.com>, (consultato Giugno 2021).

<sup>7</sup> Europa Commission, <https://ec.europa.eu>, (consultato Giugno 2021).

**Fig. 15** Schema sulle tipologie di legno scelte per le analisi dell'impatto ambientale. Elaborato personale.

## EPD

La Dichiarazione Ambientale di Prodotto EPD è un documento, redatto in base volontaria, che mostra i dati relativi agli impatti ambientali di un prodotto svolto da un'azienda produttrice e verificato da terzi. I risultati delle prestazioni ambientali vengono esposti descrivendoli dal punto di vista del ciclo di vita eseguendo una preventiva analisi LCA riportando in modo chiaro e trasparente i risultati secondo il tipo di analisi. Attraverso l'utilizzo di indicatori ambientali è possibile visualizzare i dati in forma sintetica.<sup>8</sup>

Il documento ha valenza internazionale ed è applicabile a qualsiasi tipo di prodotto o servizio, inoltre, offre grandi vantaggi sia ai produttori che ai consumatori: i primi dimostrano un'attenta analisi dei prodotti o servizi che offrono mostrando un certo interesse verso le tematiche ambientali mentre i secondi hanno la possibilità di ottenere informazioni dettagliate e trasparenti sul prodotto o servizio stesso.<sup>9</sup>

Le fasi minime di analisi comprendono l'estrazione del materiale, il trasporto e la produzione stessa del prodotto finale (dalla culla al cancello).

### Descrizione dei confini del sistema

Fig. 16

FASE PRODOTTO			FASE DI COSTRUZIONE		FASE D'USO							FASE DI FINE VITA				BENEFICI E IMPATTI OLTRE I CONFINI DEL SISTEMA		
Fornitura materiale allo stato naturale	Trasporto	Produzione	Trasporto "dal cancello al cantiere"	Installazione	Uso	Manutenzione	Riparazione	Sostituzione	Riqualificazione	Consumo energetico di esercizio	Consumo idrico di esercizio	Smantellamento	Demolizione	Trasporto	Trattamento rifiuti	Smaltimento	Potenzialità di riuso, valorizzazione e riciclaggio	D
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D		
X	X	X	MND	MND	MND	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	MND	MND	X	MND	X		

→ Fase di analisi

<sup>8</sup> EPD Italy, <https://www.epditaly.it>, (consultato Giugno 2021).

<sup>9</sup> Studio essepi, <https://www.studioessepi.it>, (consultato Giugno 2021).

Per ogni materiale delle aziende produttrici è stata considerata un'unità di riferimento pari a 1 m<sup>3</sup> e i dati presi in considerazione per il calcolo dell'Embodied Carbon(EC) ed Embodied Energy(EE) sono:

- **GWP**: Potenziale di riscaldamento global (EC)

**Fig. 16** Tabella dei confini del sistema dell'analisi LCA presente nel file EPD.

- **PERT:** Utilizzo totale di risorse energetiche primarie rinnovabili (EE)
- **PENRT:** Utilizzo totale di risorse energetiche primarie non rinnovabili (EE)

**Fig. 17** **Impatto ambientale materiali**

#### Legno lamellare

<b>Azienda:</b>	Rubner Holding AG - S.p.A.
<b>Densità:</b>	464 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Potenziale di riscaldamento globale (GWP):</b>	-646 Kg CO <sub>2</sub> Eq
<b>Utilizzo totale di risorse energetiche primarie rinnovabili (PERT):</b>	11300 MJ
<b>Utilizzo totale di risorse energetiche primarie non rinnovabili (PENRT):</b>	1500 MJ

#### Legno massiccio

<b>Azienda:</b>	Forest and Wood Products Australia Ltd
<b>Densità:</b>	735 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Potenziale di riscaldamento globale (GWP):</b>	-888 Kg CO <sub>2</sub> Eq
<b>Utilizzo totale di risorse energetiche primarie rinnovabili (PERT):</b>	13500 MJ
<b>Utilizzo totale di risorse energetiche primarie non rinnovabili (PENRT):</b>	2510 MJ

#### OSB tipo 3

<b>Azienda:</b>	Fritz EGGER GmbH & Co. OG
<b>Densità:</b>	607 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Potenziale di riscaldamento globale (GWP):</b>	-753 Kg CO <sub>2</sub> Eq
<b>Utilizzo totale di risorse energetiche primarie rinnovabili (PERT):</b>	13000 MJ
<b>Utilizzo totale di risorse energetiche primarie non rinnovabili (PENRT):</b>	4400 MJ

#### Compensato

<b>Azienda:</b>	UPM Plywood Oy
<b>Densità:</b>	680 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Potenziale di riscaldamento globale (GWP):</b>	-250,8 Kg CO <sub>2</sub> Eq
<b>Utilizzo totale di risorse energetiche primarie rinnovabili (PERT):</b>	46527 MJ
<b>Utilizzo totale di risorse energetiche primarie non rinnovabili (PENRT):</b>	14413 MJ

**Fig. 17** Tipologia e Impatto ambientale per metro cubo di materiale.  
Elaborato personale.

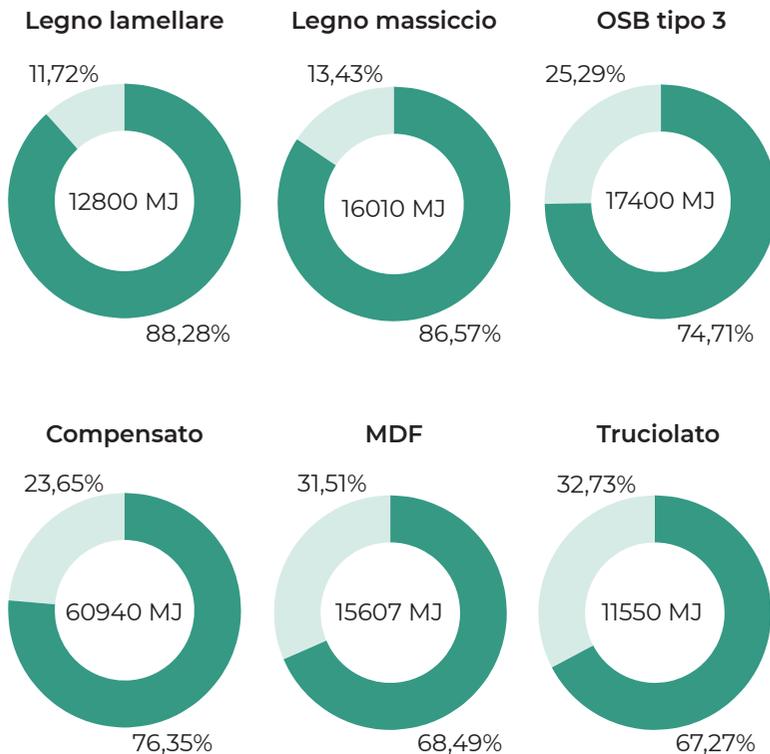
### MDF

<b>Azienda:</b>	Norbord Europe Ltd,
<b>Densità:</b>	650 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Potenziale di riscaldamento globale (GWP):</b>	-707 Kg CO <sub>2</sub> Eq
<b>Utilizzo totale di risorse energetiche primarie rinnovabili (PERT):</b>	10689 MJ
<b>Utilizzo totale di risorse energetiche primarie non rinnovabili (PENRT):</b>	4917,86 MJ

### Truciolato

<b>Azienda:</b>	Forest and Wood Products Australia Ltd
<b>Densità:</b>	660 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Potenziale di riscaldamento globale (GWP):</b>	-812 Kg CO <sub>2</sub> Eq
<b>Utilizzo totale di risorse energetiche primarie rinnovabili (PERT):</b>	7770 MJ
<b>Utilizzo totale di risorse energetiche primarie non rinnovabili (PENRT):</b>	3780 MJ

### Energia primaria rinnovabile e non rinnovabile Fig. 18



**Fig. 18** Grafici sulle percentuali di utilizzo di energia primaria rinnovabile e non rinnovabile. Elaborato personale.

## Scelta materiali

Le scelte sulla tipologia di legno utilizzata per le parti che compongono il volume di progetto non fanno riferimento ai soli valori di Embodied Energy ed Embodied Carbon ma lasciano spazio ad ulteriori valutazioni di tipo estetico e funzionale.

Fig. 19

### Valori di Embodied Energy ed Embodied Carbon

Elementi strutturali = 1,73 m<sup>3</sup>

#### Legno lamellare

(EC)  $-646 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^3 \times 1,73 \text{ m}^3 = -1117,58 \text{ CO}_2$

(EE)  $12800 \text{ MJ}/\text{m}^3 \times 1,73 \text{ m}^3 = 22144 \text{ MJ}$

#### Legno massiccio

(EC)  $-888 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^3 \times 1,73 \text{ m}^3 = -1536,24 \text{ CO}_2$

(EE)  $16010 \text{ MJ}/\text{m}^3 \times 1,73 \text{ m}^3 = 27697,3 \text{ MJ}$

Pannelli = 61,50 m<sup>2</sup> (Spessore 2 cm)

#### OSB tipo 3

(EC)  $-753 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^3 \times 0,02 \text{ m} = -15,06 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^2$

(EE)  $17400 \text{ MJ}/\text{m}^3 \times 0,02 \text{ m} = 340 \text{ MJ}/\text{m}^2$

#### Compensato

(EC)  $-250,8 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^3 \times 0,02 \text{ m} = -5,02 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^2$

(EE)  $60940 \text{ MJ}/\text{m}^3 \times 0,02 \text{ m} = 1212 \text{ MJ}/\text{m}^2$

#### MDF

(EC)  $-707 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^3 \times 0,02 \text{ m} = -14,14 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^2$

(EE)  $15607 \text{ MJ}/\text{m}^3 \times 0,02 \text{ m} = 312,14 \text{ MJ}/\text{m}^2$

Pavimentazione = 42,80 m<sup>2</sup> (Spessore 3 cm)

#### OSB tipo 3

(EC)  $-753 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^3 \times 0,03 \text{ m} = -22,59 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^2$

(EE)  $17400 \text{ MJ}/\text{m}^3 \times 0,03 \text{ m} = 522 \text{ MJ}/\text{m}^2$

#### Compensato

(EC)  $-250,8 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^3 \times 0,03 \text{ m} = -7,52 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^2$

(EE)  $60940 \text{ MJ}/\text{m}^3 \times 0,03 \text{ m} = 1828,2 \text{ MJ}/\text{m}^2$

#### Truciolato

(EC)  $-812 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^3 \times 0,03 \text{ m} = -24,36 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^2$

(EE)  $11550 \text{ MJ}/\text{m}^3 \times 0,03 \text{ m} = 346,5 \text{ MJ}/\text{m}^2$

Fig. 19 Valori di Embodied Energy ed Embodied Carbon per quantità di materiale. Elaborato personale.

Per la scelta del legno strutturale, confrontando i valori tra quello lamellare e massiccio, il secondo presenta dei valori di Embodied Carbon inferiori al primo tipo.

I Kg di CO<sub>2</sub> per il legno assumono valori negativi in quanto il materiale assorbe anidride carbonica dall'aria e la trattiene al suo interno. Dalle successive fasi di estrazione e produzione la quantità di CO<sub>2</sub> sarà maggiore in quanto viene compensata con la quantità di anidride carbonica rilasciata nell'ambiente durante le fasi di lavorazione.

1. La quantità di energia primaria adottata per un metro cubo di materiale è maggiore per il legno massiccio e utilizza energia primaria rinnovabile inferiore di quasi 2% rispetto al legno lamellare, inoltre quest'ultimo, grazie alla sua composizione in diversi strati, riduce le tensioni interne evitando fessurazioni nel tempo, pertanto si è optato verso la scelta del legno lamellare per gli elementi strutturali.

2. I materiali confrontati per i pannelli mostrano chiaramente i valori di Embodied Energy ed Embodied Carbon simili per l'MDF e l'OBS mentre il compensato risulta 3 volte più impattante rispetto agli altri due, anche se i valori di Embodied Carbon sono sempre negativi. Nonostante abbia un impatto maggiore rispetto agli altri due, si è scelto il compensato in quanto le proprietà meccaniche di questa tipologia di legno, nell'utilizzo di pannelli esterni agganciati alla struttura, risultano più efficienti rispetto agli altri due. L'MDF e l'OSB sono composti prevalentemente da trucioli di legno e se utilizzati potrebbero compromettere la stabilità dei pannelli essendo posti verticalmente. Un'ultimo fattore è sicuramente quello estetico, trattandosi di elementi esterni visibili a primo impatto.

3. Infine per la pavimentazione e per la rampa si è escluso il compensato per i motivi inizialmente citati e si è scelto l'OBS tipo 3, superiore del 7% rispetto al truciolato nell'utilizzo di energia primaria rinnovabile e adatto all'uso in ambienti esterni ed umidi grazie all'impiego di un collante apposito.

## Impatto struttura

Il legno sostituisce gran parte dei materiali tradizionali da costruzione la cui produzione è ad elevata intensità di CO<sub>2</sub>. Le tipologie di legno e le densità influiscono molto sulla quantità di anidride carbonica assorbita. Di seguito vengono riportate le masse dei materiali utilizzati e le rispettive quantità di anidride carbonica imprigionata.

**Fig. 20 Kg di CO<sub>2</sub> assorbiti rispetto alla massa**

**Legno lamellare (Struttura) = 1,73 m<sup>3</sup>**

$-646 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^3 \times 1,73 \text{ m}^3 = -1117,58 \text{ Kg CO}_2$   
 $464 \text{ Kg/m}^3 \times 1,73 \text{ m}^3 = 802,72 \text{ Kg}$

Peso struttura 431,52 Kg

Kg di CO<sub>2</sub> assorbita (A1-A3) 1117,58 Kg CO<sub>2</sub>

**Legno OSB tipo 3 da 3 cm (Pavimentazione) = 42,80 m<sup>2</sup>**

$-22,59 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^2 \times 42,80 \text{ m}^2 = -966,50 \text{ Kg CO}_2$   
 $607 \text{ Kg/m}^3 \times 0,03 \text{ m} \times 42,80 \text{ m}^2 = 779,39 \text{ Kg}$

Peso pavimentazione 779,39 Kg

Kg di CO<sub>2</sub> assorbita (A1-A3) 966,50 Kg CO<sub>2</sub>

**Legno Compensato da 2 cm (Pannelli) = 61,50 m<sup>2</sup>**

$-15,06 \text{ Kg CO}_2/\text{m}^2 \times 61,50 \text{ m}^2 = -926,19 \text{ Kg CO}_2$   
 $680 \text{ Kg/m}^3 \times 0,02 \text{ m} \times 61,50 \text{ m}^2 = 836,4 \text{ Kg}$

Peso pannelli 836,4 Kg

Kg di CO<sub>2</sub> assorbita (A1-A3) 926,19 Kg CO<sub>2</sub>

**Fig. 21 Composizione legni utilizzati**

**Legno lamellare (Struttura)**

Lamelle di legno + colla (stessa direzione delle fibre)

**Legno massiccio**

Lamelle di legno (durame) + colla

**Legno OSB tipo 3 (Pavimentazione)**

Truciolini di legno + colla (pressati a caldo)

**Legno Compensato (Pannelli)**

Fogli di legno sottili + colla (fibre incrociate)

**Legno MDF**

Fibre di legno + resine o colla (pressati a caldo)

**Legno Truciolare**

Truciolini di legno + colla (pressati a caldo)

**Fig. 20** Quantità di anidride carbonica assorbita dal legno durante le fasi di estrazione, trasporto e produzione per i rispettivi chilogrammi di materiale. Elaborato personale.

**Fig. 21** Composizione dei legni presi in analisi. Elaborato personale.

Il legno è una risorsa rinnovabile spesso riutilizzata per creare nuovi prodotti. I legni composti da trucioli o fibre di legno sono spesso ricavati dallo scarto di materiale, conservando le proprietà del legno di mantenere la CO<sub>2</sub> al suo interno. L'anidride carbonica assorbita dall'ambiente durante la sua crescita, viene trasformata in Carbonio e immagazzinata all'interno del legno. Questo processo contribuisce a rallentare il riscaldamento globale.

In Europa la quantità di legno presente aumenta dal momento che la superficie forestale accresce rispetto al quantitativo di legname tagliato. Mantenendo questo bilancio è possibile sfruttare il legno come risorsa di energia derivante dalla combustione del materiale.<sup>10</sup> La biomassa legnosa può essere sfruttata specialmente per la produzione di energia elettrica oppure energia termica. Contrariamente al riciclo, questo metodo permette di sfruttare l'energia inglobata nel legno ma allo stesso tempo trasforma il Carbonio presente in CO<sub>2</sub> che viene nuovamente rilasciata nell'ambiente. Uno dei principali vantaggi derivanti dalla combustione del legno, e in generale delle biomasse, è che la quantità di CO<sub>2</sub> riemessa in ambiente è pari a quella assorbita, mantenendo un bilancio fra inquinante prodotto e assorbito.<sup>11</sup>

I vantaggi dell'utilizzo del legno nell'edilizia sono favoriti dalla versatilità del materiale nell'essere sfruttato in maniere diverse in base alle esigenze. Sfruttare le biomasse legnose comporta un vantaggio nell'utilizzo di risorse energetiche rinnovabili, sempre mantenendo la quantità di legno prodotto maggiore di quello effettivamente utilizzato.

Nei calcoli precedenti si è visto come il legno contribuisca a ridurre il riscaldamento globale sequestrando CO<sub>2</sub> dall'ambiente durante la sua crescita. La CO<sub>2</sub> assorbita rimane immagazzinata all'interno della biomassa legnosa finché non viene rilasciata nuovamente nell'ambiente dopo l'incenerimento.

Trattandosi di un'installazione temporanea, il materiale è stato pensato per il riuso e il riciclo nella sua totalità.

<sup>10</sup> Simeonato Serramenti, <https://www.simeonato.com>, (consultato Giugno 2021).

<sup>11</sup> Nextville, <https://www.nextville.it>, (consultato Giugno 2021).

## 10.4 Plastico prodotto con stampate 3D

La necessità di un riscontro visivo del progetto ha portato a creare un modello in scala del padiglione prodotto con tecnica additiva (stampate 3D). Il filamento utilizzato è composto da PLA (acido polilattico) con 20% di fibra di legno, pertanto il risultato ha aspetto, resa cromatica e consistenza simile a quelle del legno.

Definito il modello 3D con software di modellazione è stato esportato in formato STL e inoltrato alla stampante, una Geeetech Prusa i3 Pro Bcon, le cui caratteristiche hanno permesso di stampare con una precisione di 0,2 mm per strato e diametro ugello 0,4 mm.

Dopo la produzione i telai dei pannelli sono stati successivamente assemblati utilizzando colla vinilica. Infine è stato selezionato un ramo che rappresenta in scala l'albero, al quale è stata appesa, tramite corde elastiche, la struttura prodotta con la stampante.

La simulazione ha permesso di individuare una modalità di disposizione delle brache di supporto in base alla conformazione dei rami al fine di garantire la sua staticità.

Fig. 22-33 Fotografie della stampa 3D e simulazione.

Fig. 22

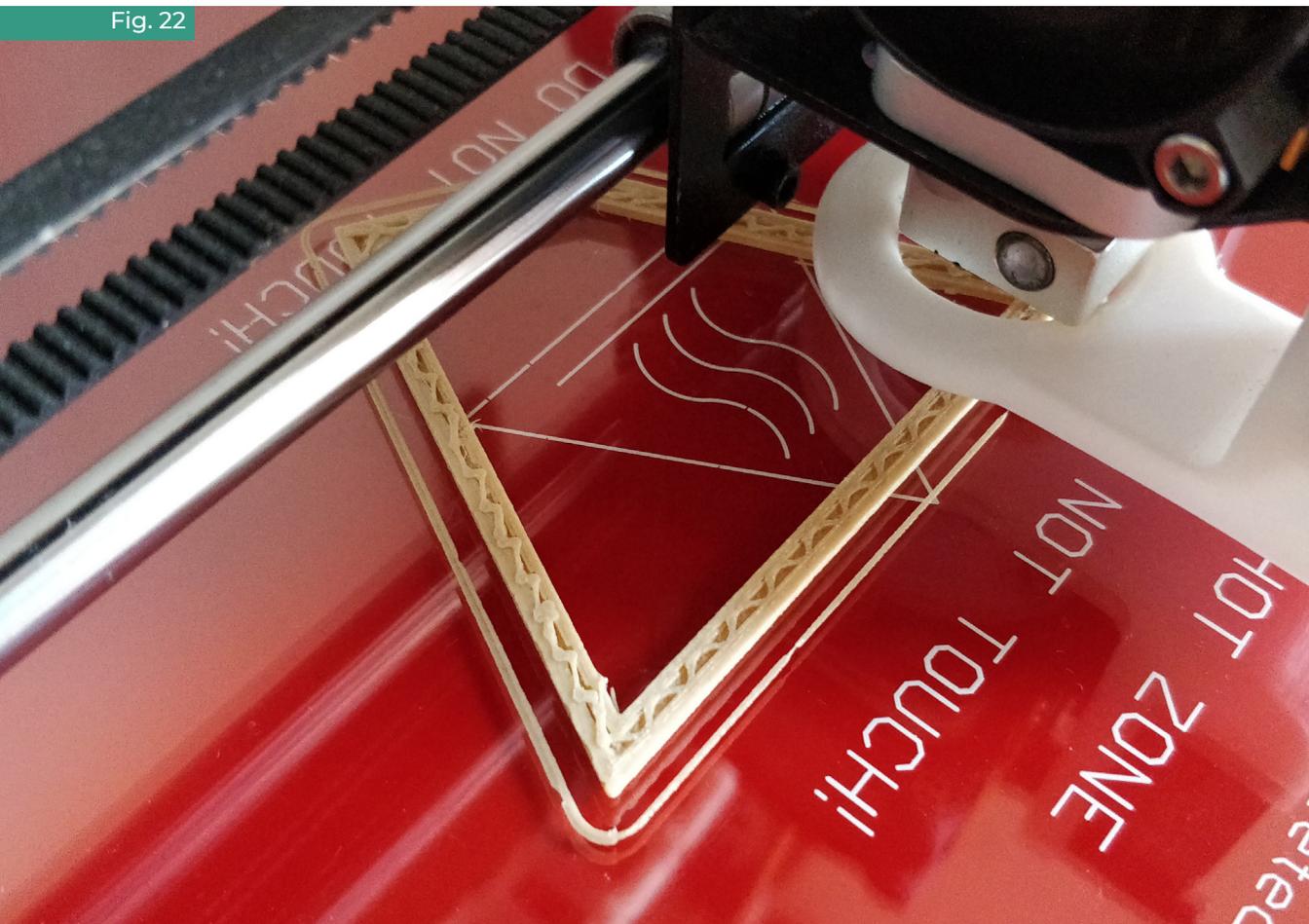




Fig. 23

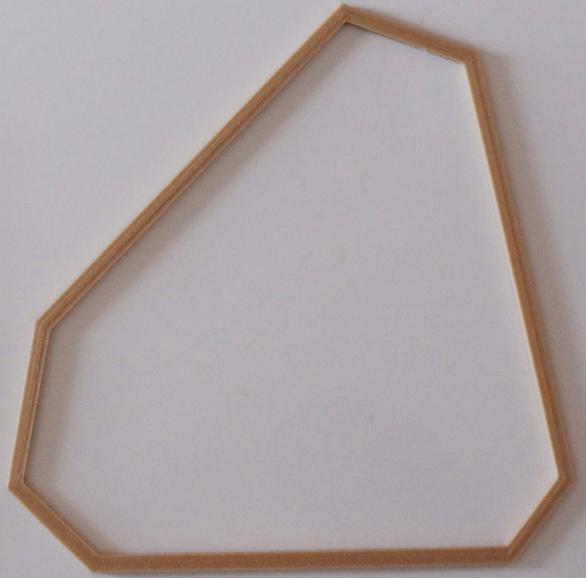


Fig. 24





Fig. 25

Fig. 26



Fig. 27

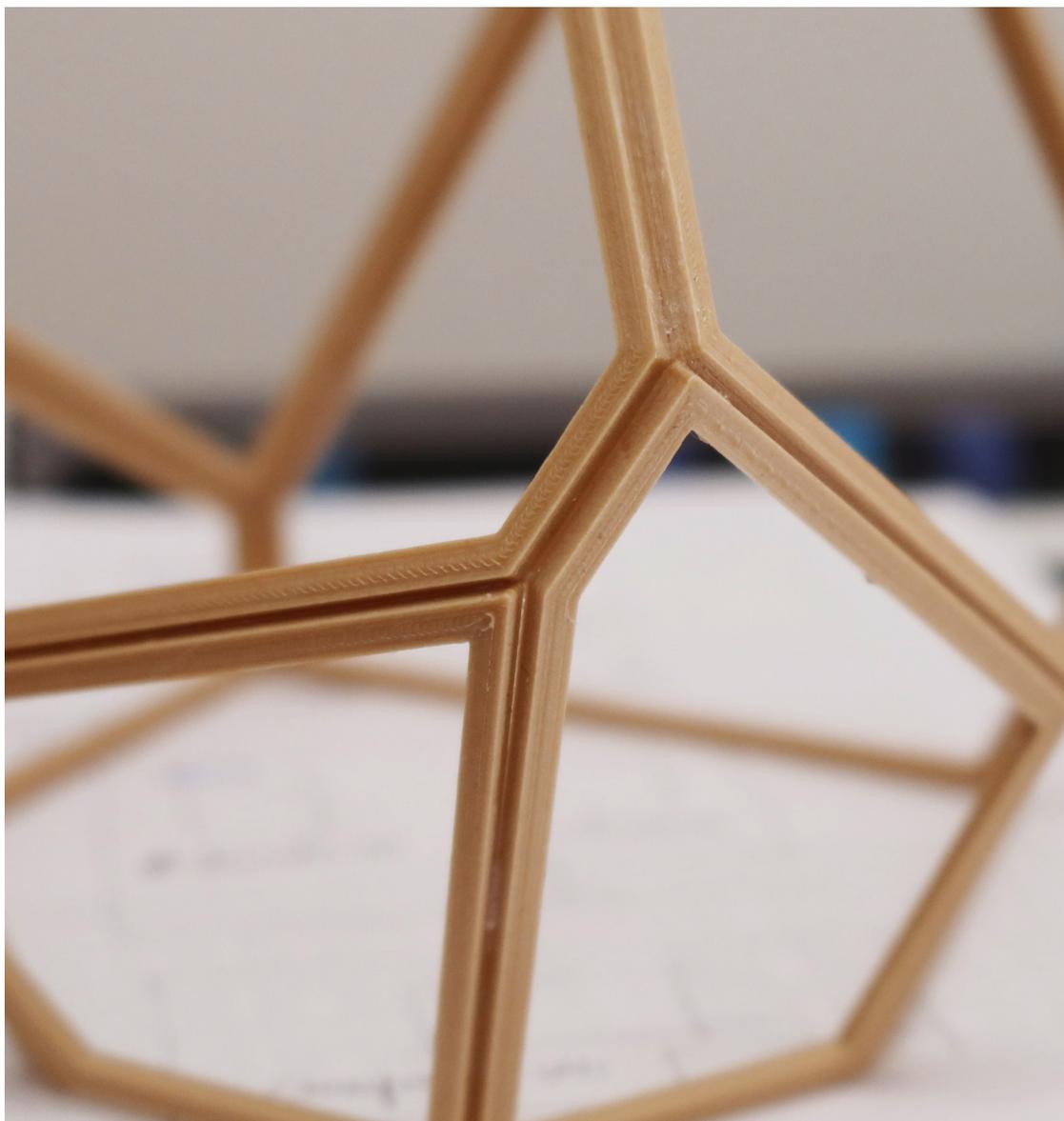


Fig. 28



Fig. 29

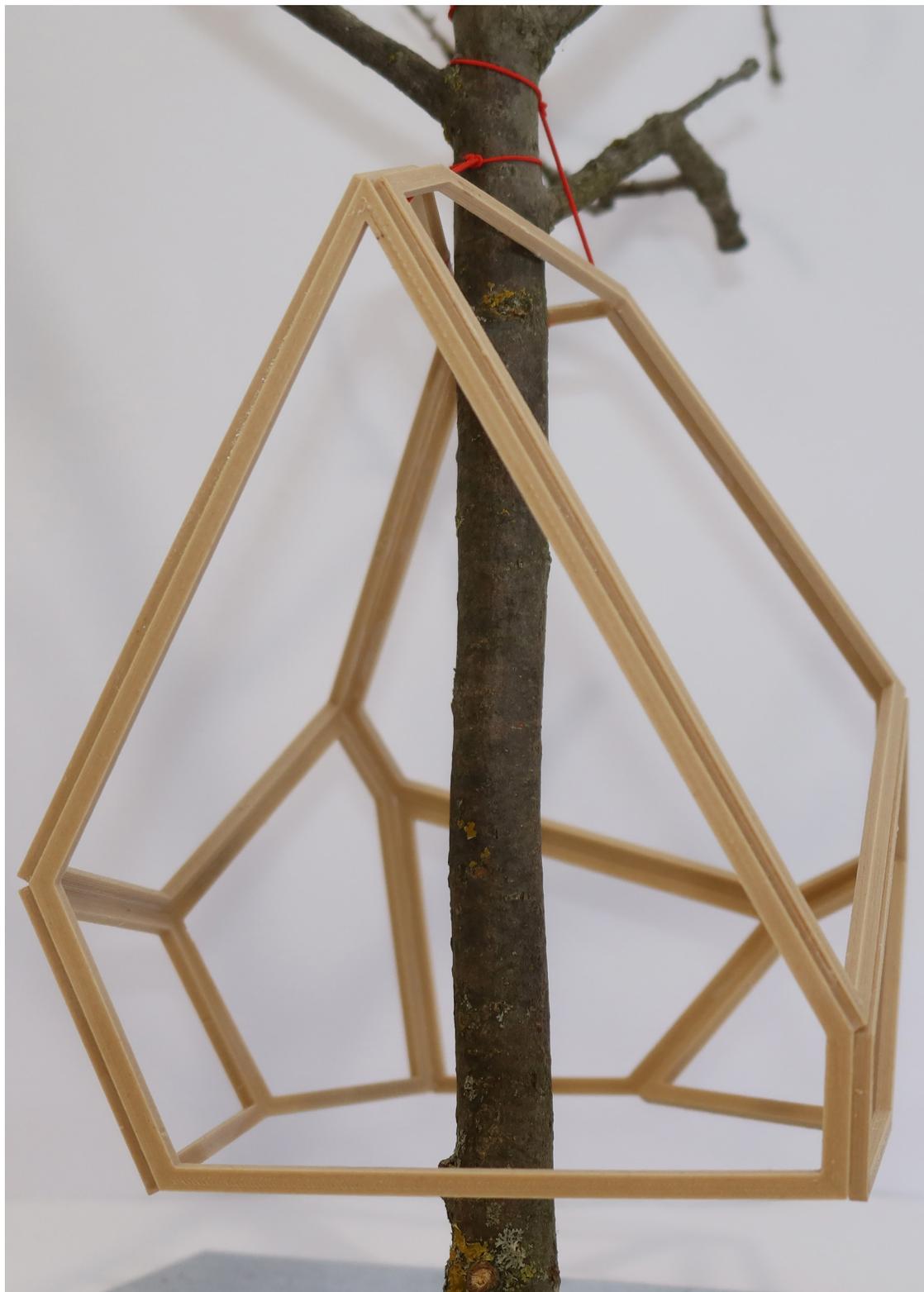


Fig. 30



Fig. 31



Fig. 32



Fig. 33



## 10.5 Modello ligneo in scala 1:2 e render

La realizzazione di un modello in scala 1:2 permette di simulare accuratamente il sistema costruttivo e di individuare criticità e apportare modifiche o migliorie al progetto stesso.

Il legno utilizzato per la costruzione è legno massiccio di castagno proveniente dalla Segheria legname Vignali di Belveglio, in provincia di Asti. È stato ricavato da alberi appartenenti a piantagioni di loro proprietà localizzate nel territorio piemontese.

Successivamente al trasporto in falegnameria, le lastre lignee sono state tagliate in travi della sezione desiderata. In seguito è avvenuta la levigatura e carteggiatura dello strato superficiale.

Infine, con l'utilizzo di una sega circolare, sono stati creati gli angoli di giunzione.

**Fig. 34-39** Foto che illustrano la trasformazione e lavorazione della materia prima in travi

**Fig. 34**



Fig. 35





Fig. 36



Fig. 37



Fig. 38



Fig. 39

## Giunzione con sistema Hoffmann

La giunzione tra gli elementi lineari in legno è stata eseguita con l'adozione di tasselli a coda di rondine Hoffmann, prodotti dall'omonima azienda tedesca.

Questa tecnica di giunzione ha larga diffusione nella produzione di serramenti e infissi in legno ma anche per elementi costruttivi sottoposti a carico o stress.

La scelta di questa tecnica è stata effettuata in comune accordo con un artigiano che opera nel settore da anni.

L'utilizzo di tasselli a coda di rondine è stato consigliato poiché favorisce l'unione degli elementi in modo funzionale, economico e non invasivo dal punto di vista estetico. Questa procedura consiste nel taglio delle due parti di legno da giuntare con la corretta angolazione, successivamente allineate e effettuato un taglio per ogni elemento in mezzera con un'apposita fresa a coda di rondine che genera una cavità a forma trapezoidale su entrambi i pezzi.

Questo taglio permette il preciso alloggiamento dei tasselli.

Tasselli e frese sono individuati con un la sigla W seguita da un numero progressivo che ne indica la dimensione (W1, W1, W2, W4). Ne esiste una grande varietà in commercio.

Nel modello in scala sono stati adottati tasselli W2, mentre nel progetto si è deciso di adottare tasselli più grandi W3.

Le travi sono state incollate in testa con una colla vinilica poliuretana D4 monocomponente specifica per l'incollaggio di legno con proprietà di resistenza all'acqua e priva di solventi.

A questo passaggio segue l'alloggiamento dei tasselli nelle apposite fessure tramite martellatura, la superficie zigrinata dei tasselli favorisce maggior adesione tra colla, legno e tassello creando un'unione duratura e resistente alle sollecitazioni.

Fig. 40

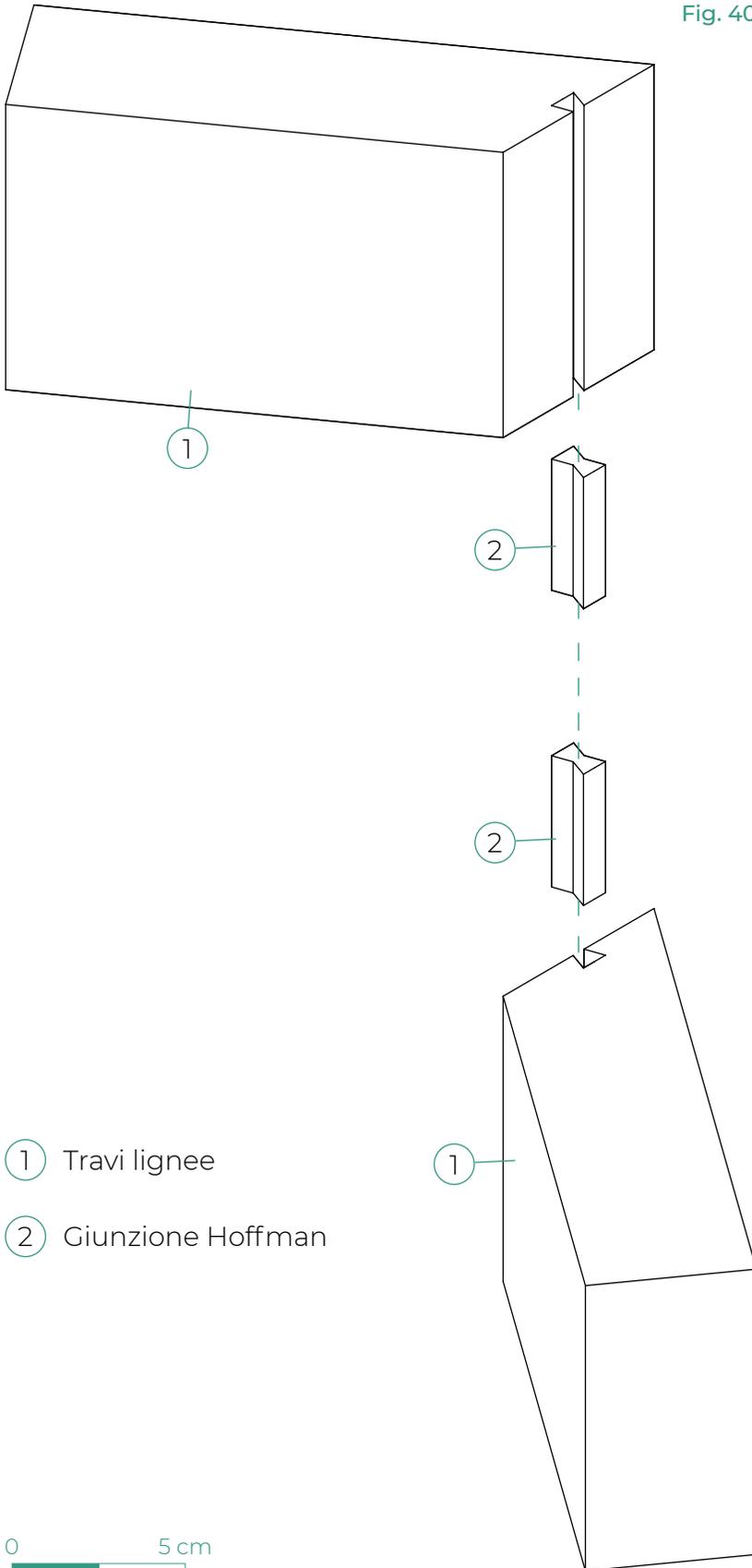
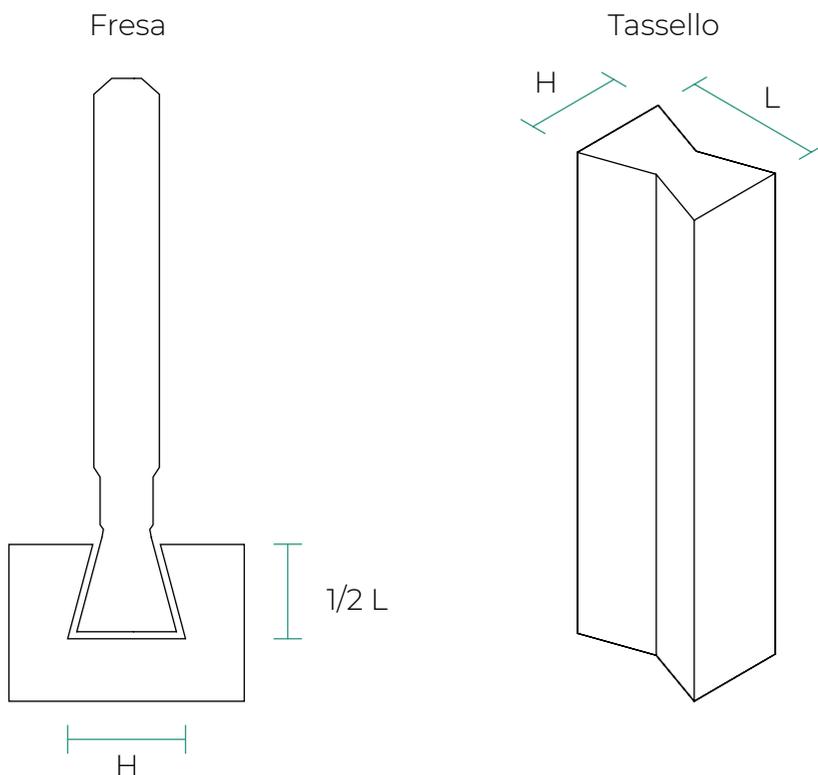


Fig. 40 Disegno che illustra lo schema di montaggio con sistema Hoffman. Elaborato personale.

Fig. 41



Frese e tasselli **W1** L: 7 mm x H: 5,5 mm  
Frese e tasselli **W2** L: 10 mm x H: 8 mm  
Frese e tasselli **W3** L: 13 mm x H: 9,5 mm  
Frese e tasselli **W4** L: 24 mm x H: 16 mm

Fig. 42



Fig. 41 Illustrazione della fresa e tassello a coda di rondine Hoffman. Elaborato personale.

Fig. 42-47 Fresatura per l'inserimento dei tasselli.



Fig. 43



Fig. 44



Fig. 45



Fig. 46

Fig. 47

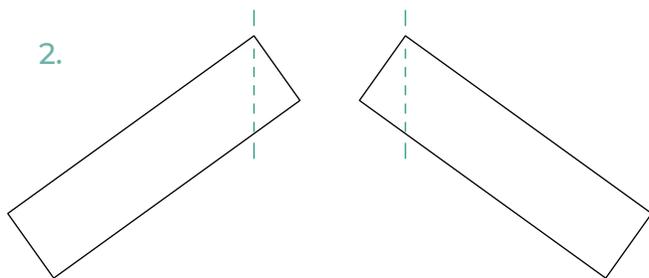
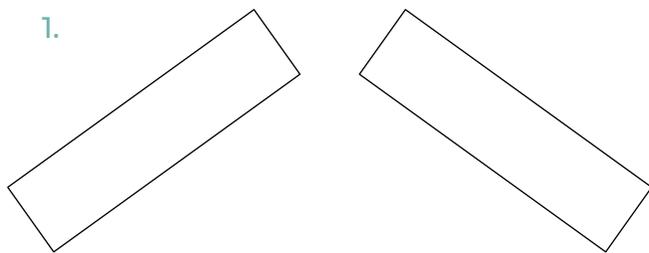


Fig. 48

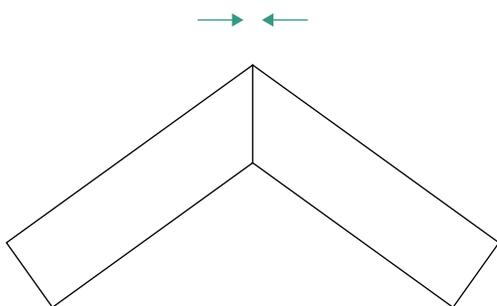


Fig. 48 Fotografie delle fasi di montaggio.

Fig. 49



3.



4.

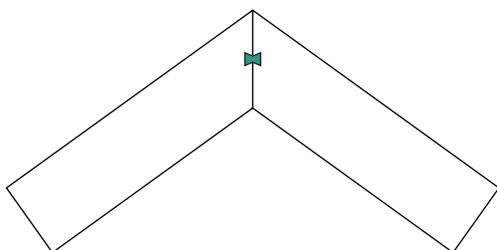


Fig. 49 Fasi di montaggio di due travi strutturali. Elaborato personale.

Fig. 50-53 Assemblaggio della struttura.



Fig. 50

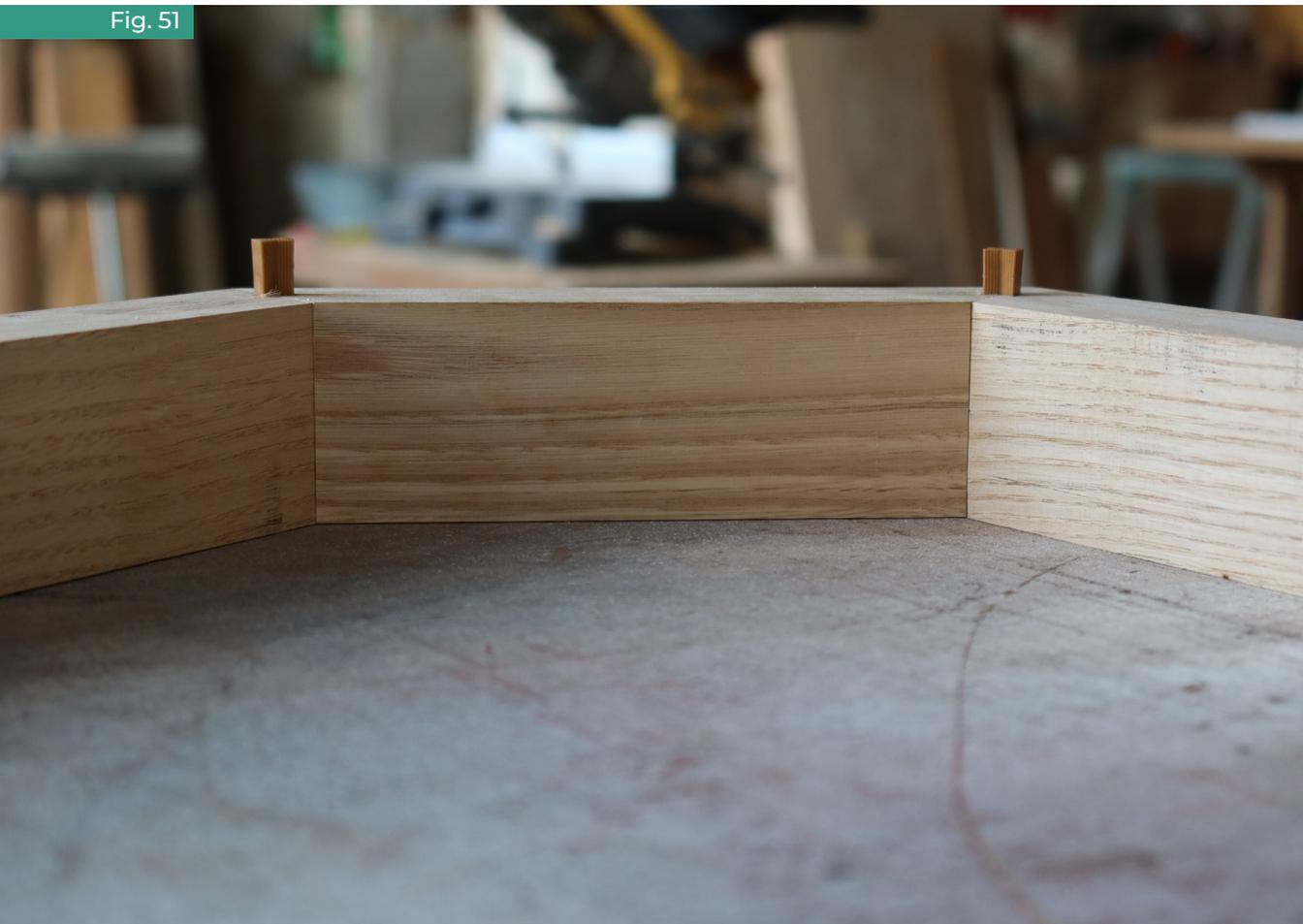


Fig. 51



Fig. 52



Fig. 53

## Taglio pannelli con fresatrice a controllo numerico

Per la realizzazione dei pannelli si è fatto affidamento all'azienda Linealegno di Acqui Terme, che ha adoperato la macchina **Format4 Profit H200**, un'avanzata macchina per fresatura a controllo numerico.

Attraverso questo strumento è stato possibile tagliare lastre di compensato di pioppo della forma desiderata in pochi secondi con risultati di altissima precisione e accuratezza.

Per effettuare il taglio è stato necessario fornire il file DXF contenente i disegni dei pannelli ed elaborato dal software del macchinario.

Successivamente viene selezionata la fresa più adatta alla lavorazione e, dopo aver alloggiato il pannello di compensato sull'area di taglio, alcune ventose aspirano l'aria per mantenere stabile il pannello.

Una volta stampati gli elementi, questi vengono rifiniti con un refilatore per smussare e raggiare gli spigoli per poi essere levigati con una carteggiatrice orbitale.

**Fig. 54-64** Foto del macchinario Format4 Profit H200, dell'interfaccia e delle fasi di lavorazione.

**Fig. 54**





Fig. 55

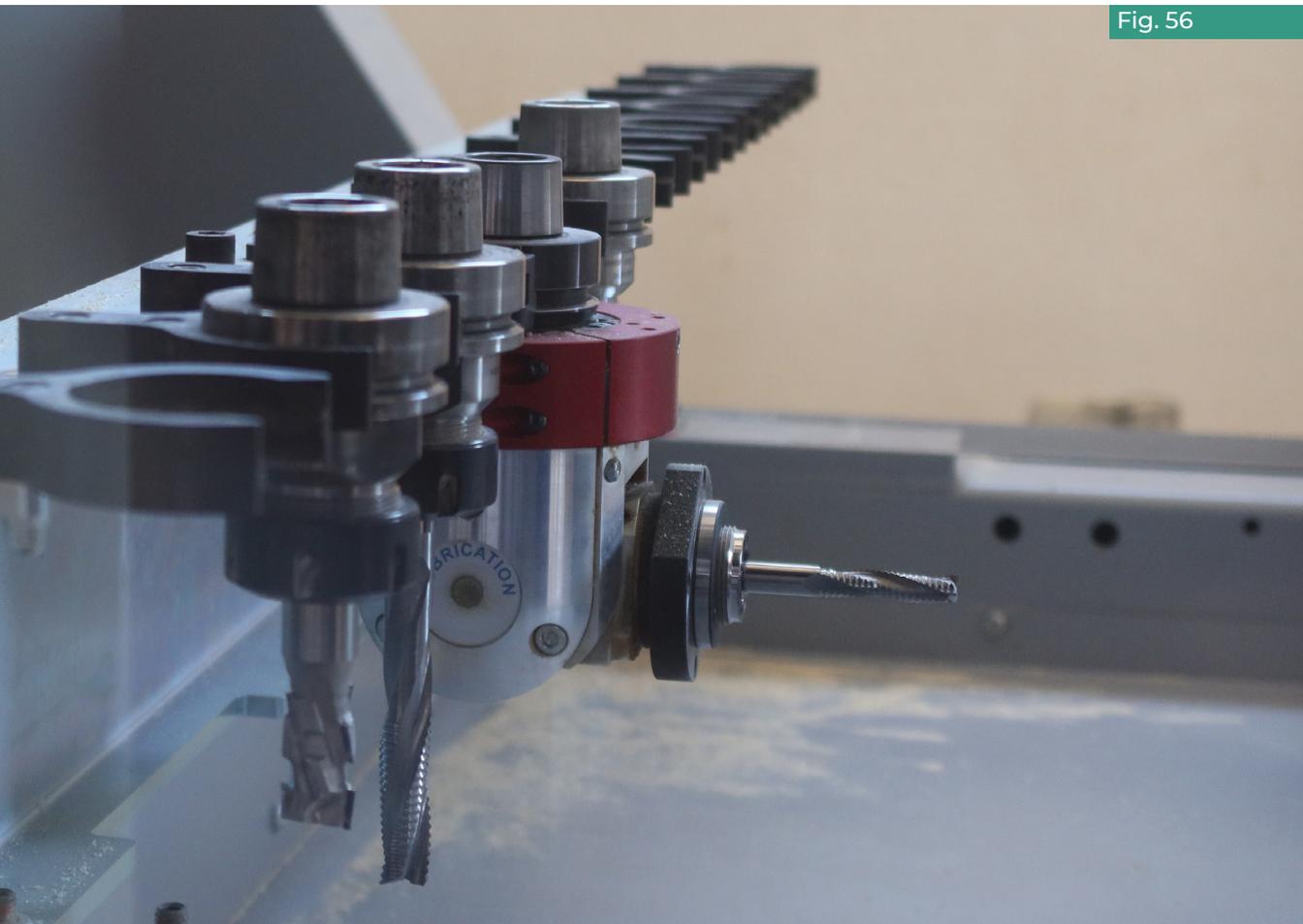


Fig. 56

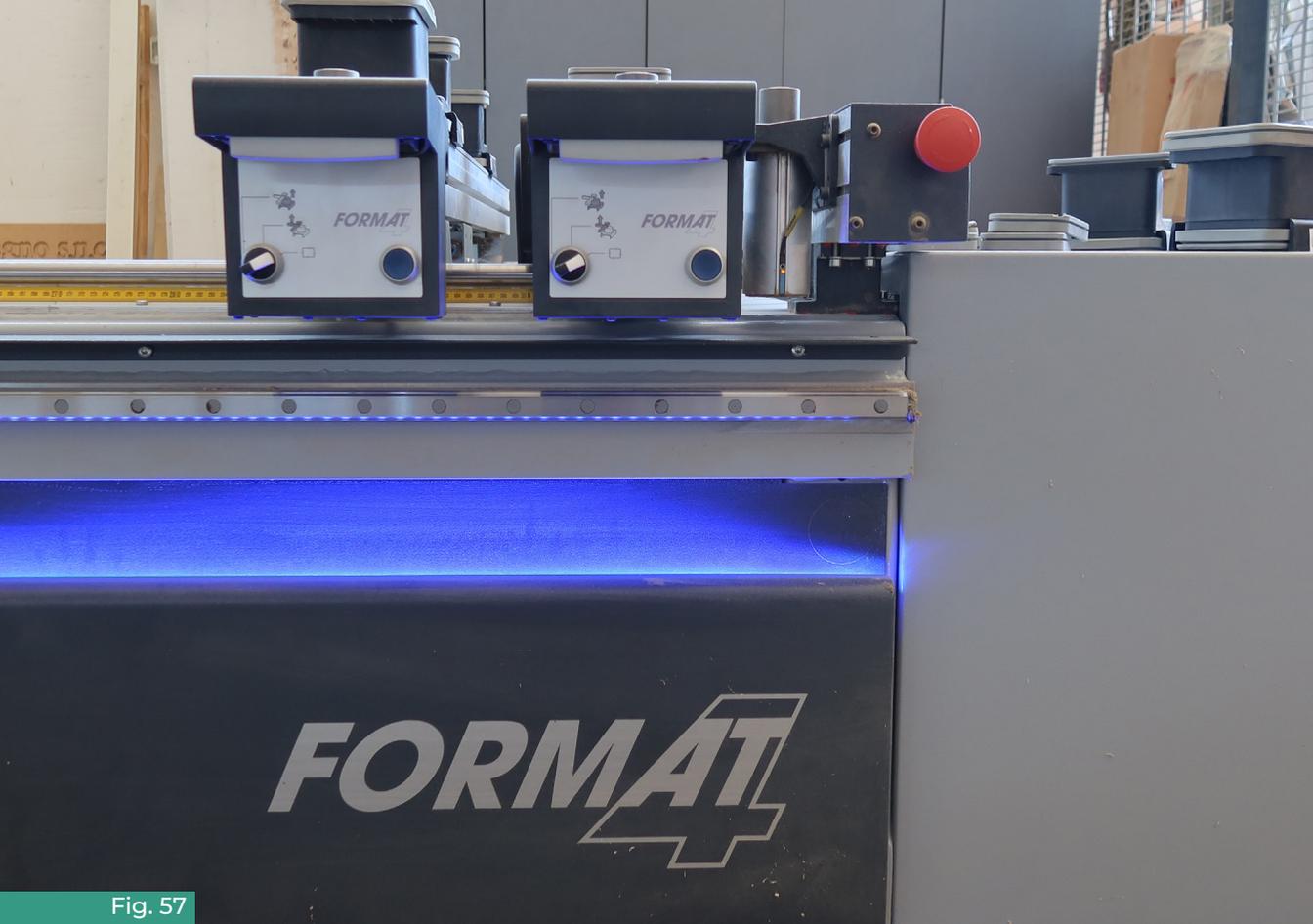


Fig. 57



Fig. 58

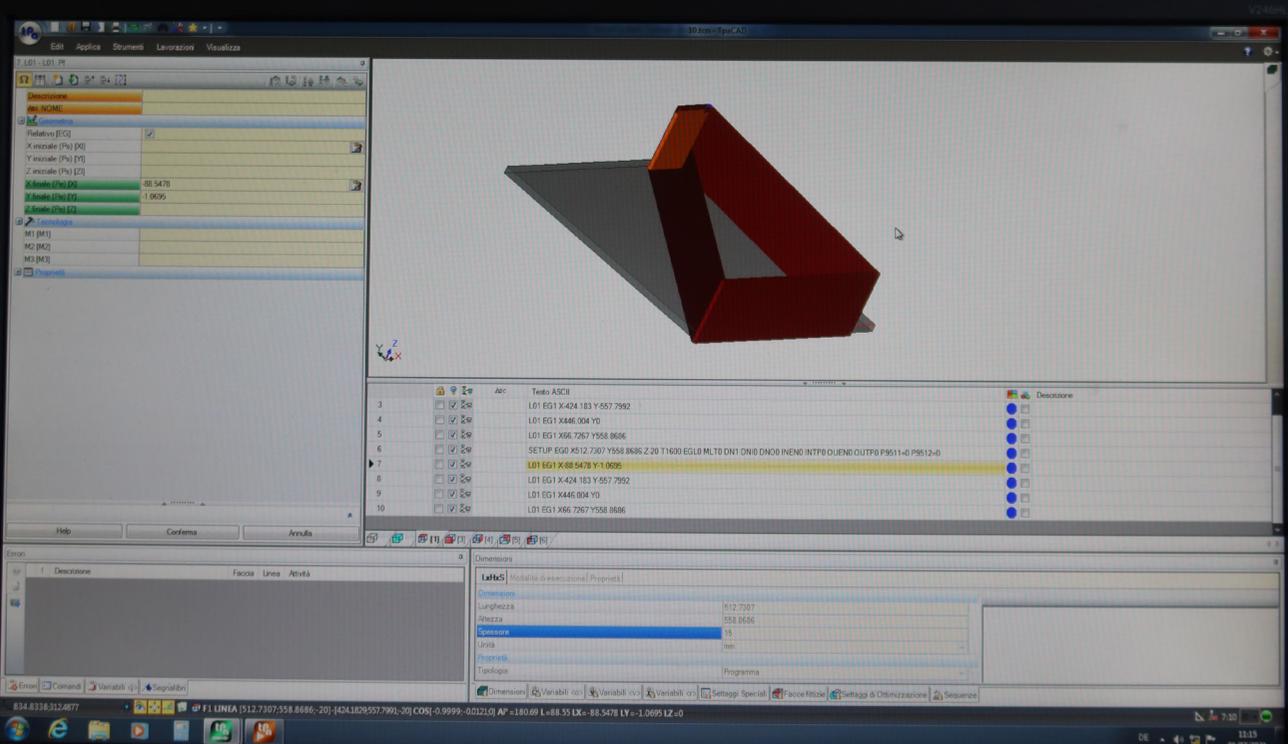


Fig. 59

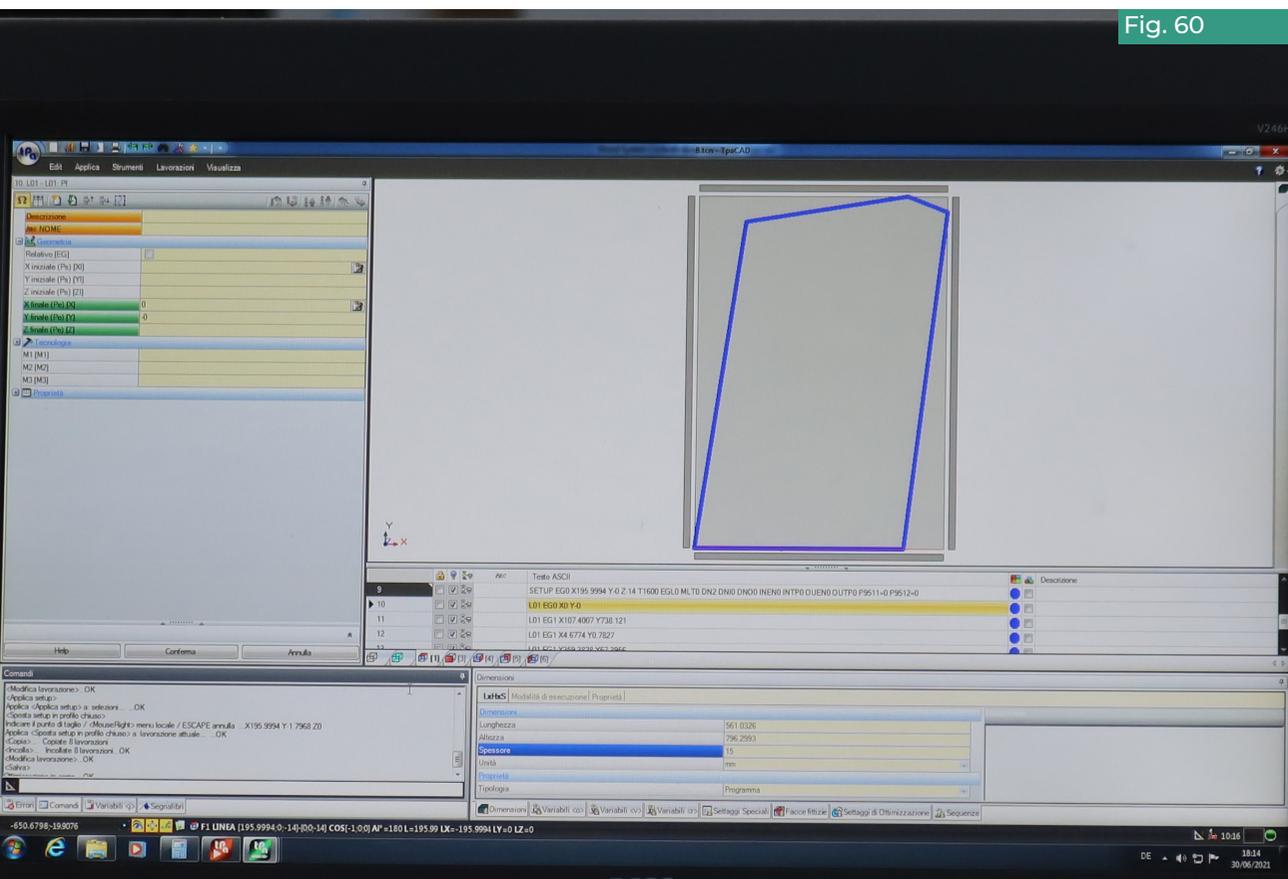


Fig. 60



Fig. 61



Fig. 62

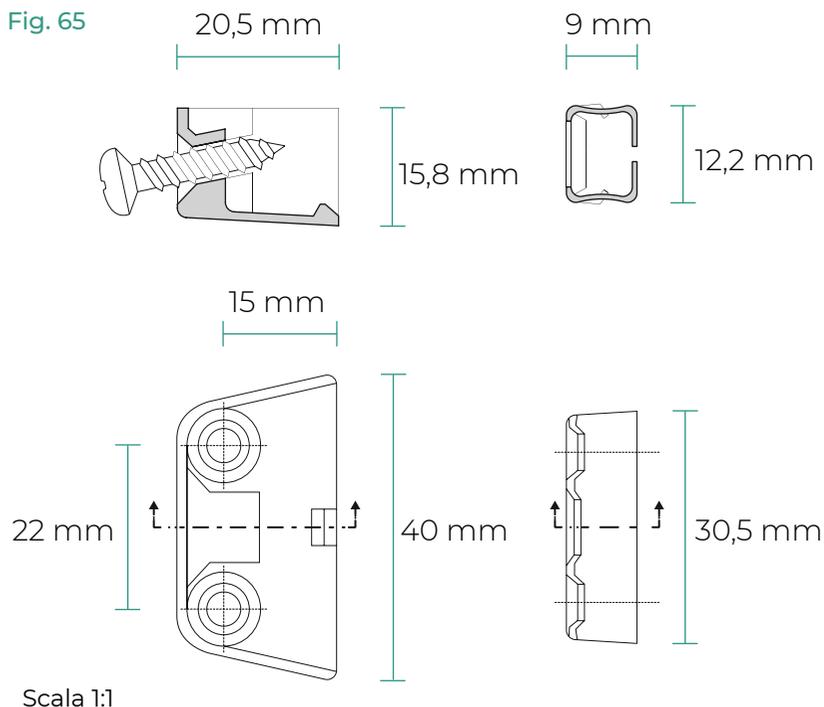


Fig. 63



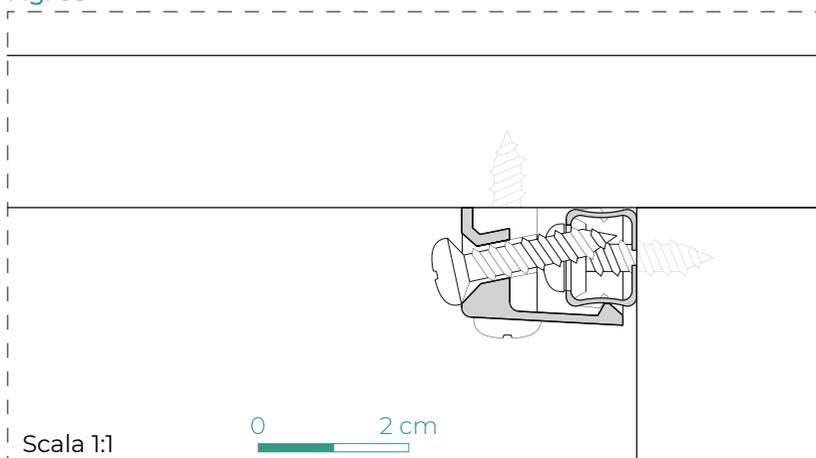
Fig. 64

## Montaggio pannelli tramite giunzioni trapezoidali



Il montaggio dei pannelli alle travi di supporto avviene grazie all'ausilio di **giunzioni trapezoidali TZ 4 TD** che vengono largamente adoperate in ambito di montaggio di mobili lignei. Le giunzioni sono elementi metallici idonei a supportare carichi elevati. La loro asola favorisce una tolleranza di circa 4 mm per compensare alla dilatazione del legno. La giunzione è costituita da due parti: un perno di bloccaggio superiore e uno inferiore. Il montaggio avviene in due fasi separate e completato dall'inserimento della vite di bloccaggio finale che possiede una inclinazione di 10°.

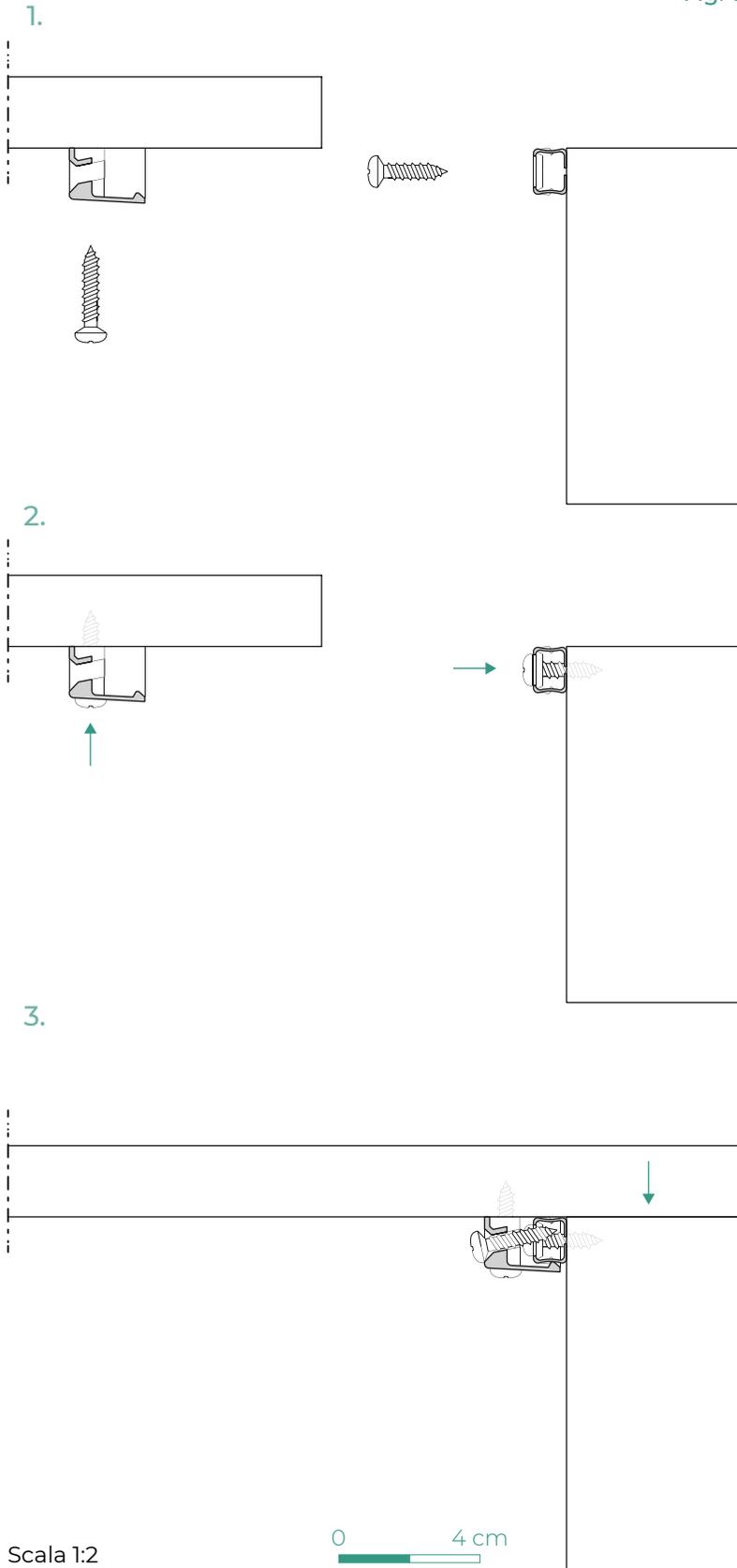
**Fig. 66**



**Fig. 65** Dettaglio tecnico delle giunzioni trapezoidali. Elaborato personale.

**Fig. 66** Sistema di avvitamento delle giunzioni. Elaborato personale.

Fig. 67



Scala 1:2

Fig. 67 Sistema di montaggio delle giunzioni.  
Elaborato personale.

Fig. 68



Fig. 68-90 Fasi di montaggio delle viti trapezoidali, delle cerniere per il movimento dei pannelli cinetici e risultato finale.



Fig. 69



Fig. 70



Fig. 71



Fig. 72



Fig. 73



Fig. 74



Fig. 75



Fig. 76



Fig. 77



Fig. 78

Fig. 79



Fig. 80





Fig. 81



Fig. 82

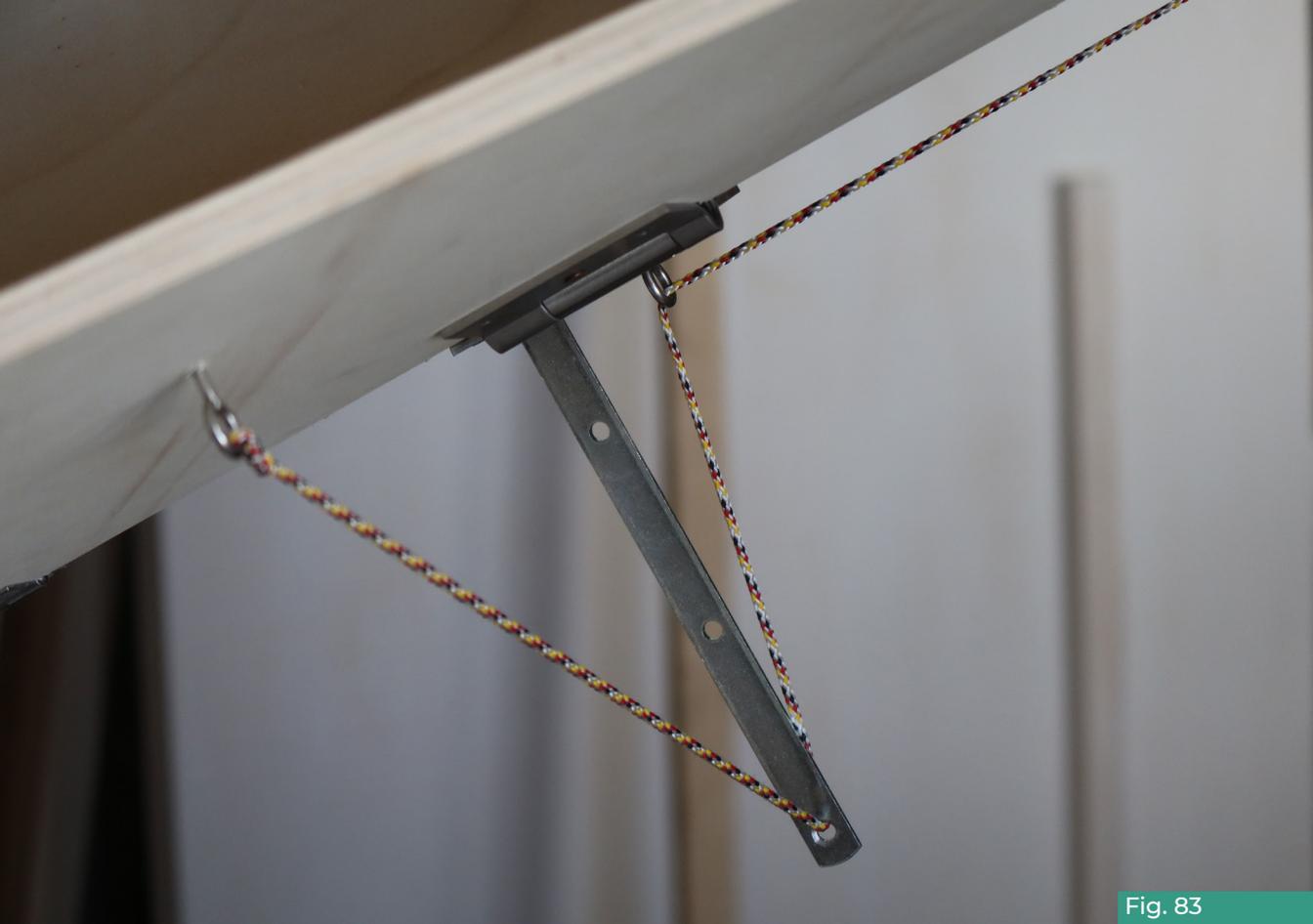


Fig. 83



Fig. 84



Fig. 85



Fig. 86

Fig. 87





Fig. 88



Fig. 89

Fig. 90



Fig. 91



Fig. 92



Fig. 91-102 Render finali di progetto.



Fig. 93



Fig. 94

Fig. 95





Fig. 96



Fig. 97

Fig. 98





Fig. 99



Fig. 100



Fig. 101



Fig. 102

# Conclusioni

La ricerca condotta per la progettazione del padiglione ha permesso di affrontare ed esplorare numerose tematiche accompagnate da strumenti e metodologie vantaggiose per la figura dell'architetto.

Il lavoro di progettazione e ricerca è stato svolto interamente in remoto grazie all'utilizzo di software che hanno agevolato lo scambio di dati e informazioni tra le parti.

L'uso di computer e software sono diventati un supporto ormai imprescindibile per il

lavoro dell'architetto, la loro rilevanza e impiego sta sempre più affiancando e supportando il lavoro del progettista. L'esperienza riportata fa riflettere sul connubio collaborativo fra l'uomo e il computer e pone degli interrogativi sul futuro della professione sempre più ibridata con l'uso di strumenti innovativi.

L'incremento della digitalizzazione cambierà inevitabilmente il paradigma della progettazione ma non sostituirà mai il lavoro del designer in quanto questi strumenti non sono in grado di replicare la sensibilità e la capacità di attribuire giudizi qualitativi del progettista. Questa esperienza ha sottolineato la natura interdisciplinare della figura dell'architetto, adattabile ai cambiamenti e alle innovazioni tecnologiche, sempre più vicino al mondo dell'informatica e programmazione. L'utilizzo di script per il design computazionale e generativo implicano una conoscenza di alcune nozioni base dell'informatica, la gestione dei dati, quindi, non è più celata all'utente ma diventa essa stessa il mezzo per risolvere i problemi durante lo sviluppo del progetto.

In questo modo all'architetto viene data anche la possibilità di agire sui parametri tramite l'uso di linguaggi di programmazione che consentono di avere pieno controllo dei dati.

L'indagine condotta sui nuovi metodi di produzione illustra come si stia innovando non solo il modo in cui si progettano gli edifici, ma anche il modo in cui essi si costruiscono.

La stampa 3D si è dimostrata un valido supporto d'indagine e strumento di analisi per un rapido riscontro simulativo aprendo la riflessione sulla sua adozione, sempre maggiore in ambito architettonico.

Il coinvolgimento di un artigiano e un'azienda nel settore della lavorazione del legno ha avviato una collaborazione che ha permesso di selezionare le strategie e scelte costruttive più adatte. Questa cooperazione ha avviato un confronto diretto tra la metodologia di lavorazione manuale, che si avvale delle sapienti conoscenze della materia prima dell'artigiano e a macchina, che adopera attrezzature atte a velocizzare la produzione e aumentare la precisione dei prodotti.

Lo studio sulla Forest Therapy ha inoltre posto una riflessione sulle prospettive future della ricettività in ambiente naturale, una nuova tendenza derivante dal cambio dei consumi e stile di vita delle persone, sempre più attente e sensibili ai temi della sostenibilità ambientale, ecologia e benessere psicofisico.

# Bibliografia

## Disposizione secondo ordine alfabetico

Achim Menges, Tobias Schwinn, Oliver David, *Advancing wood architecture an introduction in advancing wood architecture: a computational approach*, Londra: Routledge, 2017, pp. 1-3.

Adam Robertson, Frank Lam, Raymond Cole, *A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: laminated timber or reinforced concrete* in «Buildings», 2012, pp. 245-270.

Alessandro Claudi de Saint Mihiel, Enza Tersigni, Alessio D'Ambrosio, *La modellazione informativa per la mitigazione degli impatti ambientali degli edifici NZEB* in Marina Rigillo, Sergio Russo Ermolli, Fabrizio Tucci (a cura di), *Il progetto nell'era digitale. Tecnologia, Natura, cultura*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2020, p. 192.

Alex Lobos (a cura di), *Applying Generative Systems to Product Design*, atti della 22a Conferenza Internazionale Generative Art, 19-21 Dicembre 2019, Roma, Italia.

Ali Şahin<sup>1</sup>, Betül Hatipoğlu Şahin (a cura di), *Examining the use of Voronoi diagrams in architecture on a student project*, atti della Terza conferenza internazionale sulle nuove tendenze in architettura e design d'interni, 28-30 Aprile 2017, Helsinki, Finlandia.

Almerico Ribera, *Legno. L'universo costruttivo di un materiale nuovo*, Milano: Ribera legnoformazione, 2015.

Andrea Casale, Michele Calvano, *Represented models and typological algorithms: the role of parametric models for the design of product* in Paolo Cascone, Elena Ciancio, Flavio Galdi, Andrea Giglio (a cura di), *Computational Morphologies*, Springer International Publishing, 2018, pp. 63-68.

Andrea Galli, *Nuove metodologie progettuali: aspetti innovativi dell'urbanistica parametrica*, tesi di Laurea in Ingegneria Edile per il Recupero, Università degli Studi di Messina, a.a. 2010-2011, rel. Prof. Michelangelo Savino, pp. 41-46.

Annalisa Viati Navone, *Un nuovo linguaggio per il pensiero architettonico. Luigi Moretti, ricerca operativa e architettura parametrica* in Bruno Reichlin, Letizia Tedeschi (a cura di), *Luigi Moretti. Razionalismo e trasgressività tra barocco e informale*, Milano: Electa, 2010, pp. 409-419.

Annette LeCuyer, *Building Bilbao* in «Architectural Review», vol. 102, 1997, pp. 43-45.

Antoine Picon, *Architecture and the virtual: towards a new materiality?* in «Praxis Journal of Philosophy», vol. 6, 2004, pp. 114-121.

Ann Kristin Petersen, Birger Solberg, *Greenhouse gas emissions, life-cycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction* in «Environmental Science & Policy», vol. 5, 2002, pp. 169-182.

Arturo Tedeschi, *AAD algorithms aided design*, Le Penseur, 2014, pp. 22-23.

Arturo Tedeschi, Davide Lombardi, *The Algorithms-Aided Design (AAD)* in Marco Hemmerling, Luigi Cocchiarella (a cura di), *Informed Architecture Computational Strategies in Architectural Design*, Springer International Publishing, 2018, pp. 33-38.

Atsuyuki Okabe, Barry Boots, Kokichi Sugihara, Sung Nok Chiu, *Spatial Tessellations. Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*, New York: Wiley and Sons, 1992, pp. 532.

Axel Kilian, *Advancing wood architecture an introduction* in Achim Menges, Tobias Schwinn, Oliver David Krieg (a cura di), *Advancing wood architecture: a computational approach*, Londra: Routledge, 2017, pp. 1-3.

Birgül Çolakoğlu, Tuğrul Yazar, *An innovative design education approach: computational design teaching for architecture* in «METU, Journal of the Faculty of Architecture», vol. 24, 2007, pp. 159-168.

Branko Grünbaum, Geoffrey Colin Shephard, *Tilings and Patterns*, New York: W.H. Freeman & Co. Ltd, 1986.

Brian Wattchow, Mike Brown, *A Pedagogy of Place: Outdoor Education for a Changing World*, Monash University Publishing, 2011.

Bruno Munari, *Da cosa nasce cosa*, Laterza, 1981, p. 35.

Catherine Smith, Steven Le Comber, Hannah Fry, Matthew Bull, Steve Leach, *Spatial methods for infectious disease outbreak investigations: Systematic literature review* in «Eurosurveillance», vol. 20, 2015, pp. 1-3.

Celestino Soddu (a cura di), *Argenia, la naturalità' di un progetto generativo*, atti della Conferenza internazionale Generative Art '98, 16-18 Dicembre 1998, Milano, p. 8.

Charles Linn, *Creating sleek metal skins for buildings* in «Architectural Record», vol. 10, 2000, pp. 173-178.

Chorong Song, Harumi Ikei, Yoshifumi Miyazaki, *Physiological effects of nature therapy: a review of the research in japan* in «International journal of environmental research and public health» vol. 13, 2016.

Christina Cogdell, *Toward a Living Architecture?: Complexism and Biology in Generative Design*, University of Minnesota Press, 2018, p. 17.

Daniel Davis, *Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*, tesi di dottorato in Architettura, Royal Melbourne Institute of Technology, a.a. 2013, pp. 18-27.

David Robert Fell, *Wood in the human environment: restorative properties of wood In The Built Indoor Environment*, The University Of British Columbia Vancouver, 2010.

Diego Rosa Mota, Marise Takano, Pastor Willy Gonzales Taco, *Un metodo che utilizza i diagrammi Voronoi integrati GIS per l'identificazione della stazione ferroviaria dei pendolari: un caso di studio da Brasilia* in «Procedia», vol. 162 , 2014 , pp. 477-486.

Edward Bormashenko, Mark Frenkel, Alla Vilks, Irina Legchenkova, Alexander Fedorets, Nurken Aktaev, Leonid Dombrovsky, Michael Nosonovsky, *Caratterizzazione di modelli 2D autoassemblati con entropia di Voronoi* in «Entropy», vol. 20, 2018.

Eva Friedrich, *The Voronoi Diagram in Structural Optimization*, tesi magistrale in Science in Adaptive Architecture e Computation, Bartlett School of Graduate Studies, University College London, 2008.

Fabio Manfredini, Paola Pucci, Piercesare Secchi, Paolo Tagliolato, Simone Vantini, Valeria Vitelli, *Treelet Decomposition of Mobile Phone Data for Deriving City Usage and Mobility Pattern in the Milan Urban Region* in Anna Maria Paganoni, Piercesare Secchi (a cura di), *Advances in Complex Data Modeling and Computational Methods in Statistics*, Springer International Publishing, 2015.

Federica Zabini, Francesco Meneguzzo, Lorenzo Albanese, Michela Nocetti, Michele Brunetti, Luisa Neri, Rita Baraldi, *Foreste, prevenzione e cura: evidenze scientifiche* in Francesco Meneguzzo e Federica Zabini (a cura di), *Terapia forestale. Una collaborazione tra il Club Alpino Italiano e il Consiglio Nazionale delle Ricerche*, Roma: Cnr Edizioni, 2020.

Federica Zabini, Lorenzo Albanese, Francesco Riccardo Becheri, Gioele Gavazzi, Fiorenza Giganti, Fabio Giovanelli, Giorgio Gronchi, Andrea Guazzini, Marco Laurino, Qing Li, Tessa Marzi, Francesca Mastorci, Francesco Meneguzzo, Stefania Righi, Maria Pia Viggiano, *Comparative study of the restorative effects of forest and urban videos during COVID-19 Lockdown: Intrinsic and benchmark values* in «International journal of environmental research and public health», vol. 17, 2020.

Federico Bucci, Marco Mulazzani, *Luigi Moretti. Opere e scritti*, Milano: Electa, 2000, pp. 204-208.

Francesca Thiébat, *Life Cycle Design: An Experimental Tool for Designers*, Springer International Publishing, 2019, pp. 33-34.

Francesca Thiébat, *Progettazione sostenibile nel ciclo di vita* in «TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment», vol 5, 2013, pp. 177-179.

Francesco Meneguzzo, Andrea Piotti, Camilla Avanzi, Federica Zabini, *Le foreste: risorse fondamentali per la vita umana* in Francesco Meneguzzo e Federica Zabini (a cura di), *Terapia Forestale. Una collaborazione tra il Club Alpino Italiano il Consiglio Nazionale delle Ricerche*, Roma: Cnr Edizioni, 2020, pp. 13-21.

Francisco Javier Lena-Acebo, María Elena García-Ruiz, *The FABLAB Movement: Democratization of Digital Manufacturing*, in Alicia Guerra Guerra (a cura di), *Organizational Transformation and Managing Innovation in the Fourth Industrial Revolution*, Hershey: IGI Global, 2018.

Franz Aurenhammer, *Voronoi diagrams, a survey of a fundamental geometric data structure* in «ACM Computing Surveys», vol. 23, 1991, pp. 345-405.

Franz Aurenhammer, Rolf Klein, *Voronoi Diagrams* in Jörg-Rüdiger Sack, Jorge Urrutia (a cura di), *Handbook of Computational Geometry*, Elsevier, 2000.

Fulvio Wirz, *Prefazione* in Arturo Tedeschi (a cura di), *Architettura parametrica. Introduzione a Grasshopper*, Le Pensur, Potenza, 2010, p. 8.

Gabriela Celani, Carlos Eduardo, Verzola Vaz, *CAD scripting and visual programming languages for implementing computational design concepts: a comparison from a pedagogical point of view* in «International Journal of Architectural Computing», vol. 10, 2012.

George Donaldson, Luis Donaldson, *Outdoor Education: a definition* in «Journal of Health, Physical Education and Recreation», vol. 29, 1958, p. 17.

Giorgio Buratti, *Algorithmic Modelling of Triply Periodic Minimal Surface* in Paolo Cascone, Elena Ciancio, Flavio Galdi, Andrea Giglio (a cura di), *Computational Morphologies*, Springer International Publishing, 2018, p. 55.

Giuliano Galluccio, *Digitalizzazione del settore delle costruzioni tra progettazione informativa e "artigianato" avanzato* in Marina Rigillo, Sergio Russo Ermolli, Fabrizio Tucci (a cura di), *Il progetto nell'era digitale. Tecnologia, Natura, cultura*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2020.

Harumi Ikei, Chorong Song, Yoshifumi Miyazaki, *Physiological Effects of Touching Wood* in «International Journal of Environmental Research and Public Health», vol. 14, 2017.

Harumi Ikei, Chorong Song, Yoshifumi Miyazaki, *Physiological effects of wood on humans: a review* in «Journal of Wood Science», vol. 63, 2017, pp. 1-23.

Heidi Campbell, *Landscape and Child Development. A Design Guide for Early Years Kindergarten Play-Learning Environments*, 2013.

Inês Caetano, António Leitão (a cura di), *Using Processing with Architectural 3D Modelling*, atti della 34a conferenza Complexity & Simplicity: eCAADe, 2 Agosto 2016, Oulu, Finlandia, vol. 1, pp. 405-412.

Inês Caetano, Luís Santos, António Leitão, *Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design* in «Frontiers of Architectural Research», vol. 9, 2020, pp. 287-300.

James Dana, *On the Drawing of Figures of Crystals* in «American Journal of Science and Arts», vol. 18, 1837, pp. 32-50.

Jean-Francois Bastin, Yelena Finegold, Claude Garcia, Danilo Mollicone, Marcelo Rezende, Devin Routh, Constantin Zohner, Thomas Crowther, *The global tree restoration potential* in «Science», vol. 365, 2019, pp. 76-79.

John Teresko, *Parametric Technology Corp. Changing the Way Products Are Designed* in «Industry Week», 1993.

Joost van Opheusden, Jaap Molenaar, *Algorithm for a particle-based growth model for plant tissues* in «Royal Society Open Science», vol. 5, 2018.

Joseph Pine, *Mass Customization: The new frontier in business competition*, Boston: Harvard Business, 1993.

Justin Matejka, Michael Glueck, Erin Bradner, Ali Hashemi, Tovi Grossman, George Fitzmaurice (a cura di), *Dream Lens: Exploration and Visualization of Large-Scale Generative Design Datasets*, atti della 36a Conferenza Internazionale ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 21-26 Aprile 2018, Montréal, Canada.

Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, *A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II* in «IEEE Transactions on Evolutionary Computation», vol. 6, 2002, p. 182.

Ken Gilbertson, Timothy Bates, Alan Ewert, Terry McLaughlin, *Outdoor Education: Methods and Strategies*, 2005.

Kolarevic Branko (a cura di), *Digital Fabrication: manufacturing architecture in the information age in reinventing the discourse. How digital tools help bridge and transform research, education and practice in architecture*, atti della 21a Conferenza Annuale dell'Association for Computer-Aided Design in Architecture, 11-14 Ottobre 2001, Buffalo, USA, pp. 268-278.

Kostas Terzidis, *Algorithmic Design: a paradigm shift in architecture?*, atti della conferenza Architecture in the Network Society, 15-18 Settembre 2004, Copenhagen, Danimarca, pp. 201-207.

- Lauri Hetemäki, Marc Palahí, Robert Nasi, *Seeing the wood in the forests. Knowledge to Action 1*, European Forest Institute, Joensuu, Finlandia, 2020, pp. 20.
- Leonardo Baglioni, *La discretizzazione delle superfici continue*, tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo, Università degli Studi di Roma La Sapienza, a.a. 2005-2006, rel. Prof. ssa Laura De Carlo, Prof. Riccardo Migliari.
- Luisa Cabeza, Camila Barreneche, Laia Miróa, Josep Morera, Esther Bartolíc, Inés Fernández, *Low carbon and low embodied energy materials in buildings: a review* in «Renewable and Sustainable Energy Reviews», vol. 23, 2013, pp. 536-542.
- Marco Cannas, Eleonora Moi, *La scuola nel bosco architettura e Outdoor Education per l'infanzia*, tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile, a.a. 2017-2018, rel. Prof. ssa Francesca Thiebat, Prof. Lorenzo Savio.
- Marco Marchetti, Marc Palahí, *Perspectives in bioeconomy: strategies, Green Deal and Covid-19* in «Journal of Silviculture and Forest Ecology», vol. 17, 2020, pp. 52-55.
- Marco Marchetti, Renzo Motta, Davide Pettenella, Lorenzo Sallustio, Giorgio Vacchiano, *Forests and forest-wood system in Italy: towards a new strategy to address local and global challenges* in «Forest@. Journal of Silviculture and Forest Ecology», vol. 15, 2018, pp. 41-50.
- Marc van Almkerk, Gijs Huisman, *Virtual nature environments based on fractal geometry for optimizing restorative effects*, atti della 32a Conferenza Internazionale BCS Human Computer Interaction (HCI), 4-6 luglio 2018.
- Marina Sergeeva, Daniel Delahaye, Catherine Mancel, Andrija Vidosavljevic, *Dynamic airspace configuration by genetic algorithm* in «Journal of Traffic and Transportation Engineering», vol. 4, Giugno 2017, pp. 300-314.
- Marjorie Senechal, *Tassellazioni spaziali: concetti e applicazioni dei diagrammi di Voronoi* in «Science», vol. 260, 1993.
- Mark Burry, *Scripting Cultures: Architectural Design and Programming*, John Wiley & Sons, 2011.
- Martino Margoni, *Architettura contemporanea e strumenti per la progettazione architettonica. Differenti approcci alla modellazione*, tesi di Laurea in Architettura, Politecnico di Milano, a.a 2016-2017, rel. Prof.ssa Ingrid Paoletti, pp. 15-23.
- Matteo Gastaldi, Luca Bertolini, *Introduzione ai materiali per l'architettura*, Cittàstudi Edizioni, 2011, pp. 237-240.
- Matteo Vittone, *Plywood design: applicazioni e progetti dalla fine dell'Ottocento alla Digital Fabrication. Evoluzione tecnologica del compensato di legno quale componente costruttivo*, tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile, Politecnico di Torino, a.a. 2018 2019, rel. Prof. Guido Callegari.
- Matthew McKnight (a cura di), *Generative Design: What it is? How is it Being Used? Why it's a Game Changer!*, atti della International Conference on Design and Technology, 5-8 Dicembre 2016, Geelong, Australia.
- Mathew White, Ian Alcock, James Grellier, Benedict Wheeler, Terry Hartig, Sara Warber, Angie Bone, Michael Depledge, Lora Fleming, *Spending at least 120 minutes a week in nature is associated with good health and wellbeing* in «Scientific Reports», vol. 9, 2019.
- Matthias Kohler, Fabio Gramazio, Willmann Jan, *The robotic touch: how robots change architecture*, Zurigo: Park Book, 2014.

Michela Schenetti, Irene Salvaterra, Benedetta Rossini, *La scuola nel bosco. Pedagogia, didattica e natura*, Trento: Erickson, 2015.

Michele Antonelli, Davide Donelli, Grazia Barbieri, Marco Valussi, Valentina Maggini, Fabio Firenzuoli, *Aromaterapia naturale: benefici dell'aria forestale sulla salute* in Francesco Meneguzzo e Federica Zabini (a cura di), *Terapia Forestale. Una collaborazione tra il Club Alpino Italiano il Consiglio Nazionale delle Ricerche*, Roma: Cnr Edizioni, 2020.

Michele Antonelli, Davide Donelli, Grazia Barbieri, Marco Valussi, Valentina Maggini, Fabio Firenzuoli, *Composti organici volatili forestali e loro effetti sulla salute umana: una revisione all'avanguardia* in «International Journal of Environmental Research and Public Health», vol. 17, 2020.

Min Xue, *Airspace Sector Redesign Based on Voronoi Diagrams, December* in «Journal of Aerospace Computing Information and Communication», vol. 6, 2009.

Nicholas Gair, *Outdoor Education: Theory and Practice*, Continuum International Publishing Group, 1997.

Paul Francis Jacobs, *Rapid prototyping and manufacturing: fundamentals of stereolithography*, Society of Manufacturing Engineers, 1992.

Paul Jiménez, Anita Dunkl, Kerstin Eibel, Elisabeth Denk, Vincent Grote, Christina Kelz, Maximilian Moser, *Wood or laminate? Psychological research of customer expectations in «Forests»*, vol. 7, 2016, p. 275.

Peter Bentsen, Frank Jensen, Erik Mygind, Thomas Randrup, *The extent and dissemination of udeskole in Danish schools* in «Urban Forestry & Urban Greening», vol. 9, pp. 235-243.

Phyllis Ford, *Outdoor Education: Definition and Philosophy*, Washington: ERIC Clearinghouse, 1986, p.15.

Pietromaria Davoli, *Costruire con il legno. Requisiti, criteri progettuali, esecuzione, prestazioni*, Milano: Hoepli, 1996, p. 7.

Ralf Buckley, Ulrike Gretzel, Daniel Scott, David Weaver, Susanne Becken, *Tourism megatrends* in «Tourism Recreation Research», vol. 40, 2015, pp. 59-70.

Randy Deutsch, *Data-driven design and construction: 25 strategies for capturing, analyzing and applying building data*, Hoboken: Wiley, 2015.

Ryoko Masago, Tamiko Matsuda, Yoshiaki Kikuchi, Yoshifumi Miyazaki, Koichi Iwanaga, Hajime Harada, Tetsuo Katsuura, *Effects of inhalation of essential oils on EEG activity and sensory evaluation* in «Journal of physiological anthropology and applied human science», vol. 19, 2000, pp. 35-42.

Satoshi Sakuragawa, Yoshifumi Miyazaki, Tomoyuki Kaneko, Teruo Makita, *Influence of wood wall panels on physiological and psychological responses* in «Journal of Wood Science», vol. 51, 2005, pp. 136-140.

Sergio Russo Ermolli, *Tecnologia e costruzione di una nuova cultura materiale* in Massimo Perriccioli, Marina Rigillo, Sergio Russo Ermolli, Fabrizio Tucci (a cura di), *Il progetto nell'era digitale. Tecnologia, Natura, cultura*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2020.

Simona Rosace, *La rilevanza dell'educazione ambientale nelle scuole. Monitoraggio di progetti e loro efficacia in termini di modifica dei comportamenti*, tesi di Laurea Magistrale in Scienze Ambientali, a.a. 2013-2014, rel. Prof.ssa Marta Pappalardo.

Stefano Mancuso, *Plant Revolution*, Giunti Editore, 2017.

Takeshi Morikawa, Yoshifumi Miyazaki, Shigeo Kobayashi, *Time-series variations of blood pressure due to contact with wood* in «Journal of wood science», vol. 44, 1998, pp. 495-497.

Victor Theodor Cusniriu, Jorge Martillo Flores Bonavalle, *Rilievo metrico 3D, HBIM e VPL per la salvaguardia del patrimonio architettonico*, tesi di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città, Politecnico di Torino, a.a. 2018-19, rel. Prof. Massimiliano Lo Turco.

William John Mitchell, *The theoretical foundation of computer-aided architectural design* in «Environment and Planning B: Planning and Design», vol. 2, 1975.

William John Mitchell, Malcolm McCullough, *Digital design media. Strumenti digitali per il design, l'architettura e la grafica*, McGraw-Hill Education, 1996.

Xavier Marsault, *Eco-Generative Design for Early Stages of Architecture*, ISTE Ltd, 2018, pp. 62-66.

Yasmine Elmahdy, Jan Vidar Haukeland, Peter Fredman, *Tourism megatrends, a literature review focused on nature-based tourism*, 2017.

Yuko Tsunetsugu, Bum-Jin Park, Yoshifumi Miyazaki. *Trends in research related to "Shinrin-yoku" (taking in the forest atmosphere or forest bathing) in Japan* in «Environmental health and preventive medicine», vol. 15, 2010, p 27-37.

Yoshifumi Miyazaki, Juyoung Lee, Bum-Jin Park, Yuko Tsunetsugu, Keiko Matsunaga, *Preventive medical effects of nature therapy* in «Japanese journal of hygiene», vol. 66, 2011.

# Sitografia

## Disposizione secondo cronologia di consultazione

Computer History Museum, <https://www.computerhistory.org>, (consultato Dicembre 2020).

Atlante architettura contemporanea, Ministero della cultura, <https://www.atlantearchitettura.beniculturali.it>, (consultato Dicembre 2020).

Zentrum für Kunst und Medien, <https://zkm.de>, (consultato Gennaio 2021).

Zaha Hadid Architects, <https://www.zaha-hadid.com>, (consultato Gennaio 2021).

Allen Cypher, <http://acypher.com>, (consultato Gennaio 2021).

The Gaudì Research Institute, <http://tgaudiri.org>, (consultato Gennaio 2021).

Giulio Piacentino, <https://www.giuliopiacentino.com>, (consultato Gennaio 2021).

Kangaroo3d, <http://kangaroo3d.com>, (consultato Gennaio 2021).

Ladybug Tools, <https://www.ladybug.tools>, (consultato Gennaio 2021).

ExpoClima, <https://www.expoclima.net>, (consultato Febbraio 2021).

I.T.I. Marconi, <http://www.itimarconi.ct.it>, (consultato Febbraio 2021)

Modus Studio, <http://www.modusstudio.com>, (consultato Febbraio 2021).

Medium, <https://medium.com>, (consultato Febbraio 2021).

Redshift by Autodesk, <https://redshift.autodesk.it>, (consultato Marzo 2021).

Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibili, <https://www.mit.gov.it>, (consultato Marzo 2021).

Federlegnoarredo, <https://www.federlegnoarredo.it>, (consultato Marzo 2021).

PTW Architects, <https://www.ptw.com>, (consultato Marzo 2021).

Trentino Sviluppo, <http://trentinosviluppo.etour.tn.it>, (consultato Marzo 2021).

Designcoding, <https://www.designcoding.net>, (consultato Marzo 2021).

Children Nature Network, <https://www.childrenandnature.org>, (consultato Marzo 2021).

Area, <https://www.area-arch.it>, (consultato Marzo 2021).

Infobuild.it, <https://www.infobuild.it>, (consultato Marzo 2021).

FSC, <https://www.pefc.it>, (consultato Aprile 2021).

Wallacei, <https://www.wallacei.com>, (consultato Aprile 2021).

The fab Foundation, <https://fabfoundation.org>, (consultato Aprile 2020).

Orizzonte Scuola Notizie, <https://www.orizzontescuola.it>, (consultato Aprile 2021).

Wallacei, <https://www.wallacei.com>, (consultato Aprile 2021).

Arup, <https://www.arup.com>, (consultato Aprile 2021).

Norwegian University of Life Sciences NMBU, <https://nmbu.brage.unit.no>, (consultato Aprile 2021).

Promisalute, <https://www.promisalute.it>, (consultato Aprile 2021).

Architettura Ecosostenibile, <https://www.architetturaecosostenibile.it>, (consultato Aprile 2021).

Archdaily, <https://www.archdaily.com>, (consultato Aprile 2021).

Autodesk, <https://www.autodesk.it>, (consultato Maggio 2021).

Forestalegnoitalia, <https://www.forestalegnoitalia.it>, (consultato Maggio 2021).

Thinkwood, <https://www.thinkwood.com>, (consultato Maggio 2021).

WoodWorks, <https://www.woodworks.org>, (consultato Maggio 2021).

Joanneum Research, <https://www.joanneum.at>, (consultato Maggio 2021).

Architecture 2030, <https://architecture2030.org>, (consultato Maggio 2021).

Promolegno, <https://www.promolegno.com>, (consultato Maggio 2021).

Wood. Building the future, <https://www.wooddays.eu>, (consultato Maggio 2021).

Inventario Nazionale delle Foreste, <https://www.sian.it/inventarioforestale>, (consultato Maggio 2021).

CSQA, <https://www.csqa.it>, (consultato Maggio 2021).

E-cology, <https://www.e-cology.it>, (consultato Maggio 2021).

Commissione europea, <https://ec.europa.eu>, (consultato Maggio 2021).

Filiera Foresta Legno Italia, <https://www.forestalegnoitalia.it>, (consultato Maggio 2021).

Immobilgreen, <https://www.immobilgreen.it>, (consultato Maggio 2021).

Plus Magazine, <https://plus.maths.org>, (consultato Maggio 2021).

Club Alpino Italiano, <https://www.cai.it>, (consultato Maggio 2021).

PEFC, <https://www.pefc.it>, (consultato Giugno 2021).

Architetti, <https://www.architetti.com>, (consultato Giugno 2021).

Archilovers, <https://www.archilovers.com>, (consultato Giugno 2021).

Create SDU, <https://www.create-sdu.com>, (consultato Giugno 2021).

La Biennale di Venezia, <https://www.labiennale.org>, (consultato Giugno 2021).

ROK, <https://www.rok-office.com>, (consultato Giugno 2021).

Architizer, <https://architizer.com>, (consultato Giugno 2021).

Thetis, <http://www.thetis.it>, (consultato Giugno 2021).

FG comunicazione, <https://www.fg-comunicazione.it>, (consultato Giugno 2021).

Archiportale, <https://www.archiportale.com>, (consultato Giugno 2021).

The Digeon News, <https://www.thedigeon.com>, (consultato Giugno 2021).

ACLI Venezia, <https://www.aclivenezia.it>, (consultato Giugno 2021).

Scientific American, <https://www.scientificamerican.com>, (consultato Giugno 2021).

Detail, <https://www.detail.de>, (consultato Giugno 2021).

Unsplash, <https://unsplash.com>, (consultato Giugno 2021).

University of Stuttgart Institute for Computational Design and Construction, <https://www.icd.uni-stuttgart.de>, (consultato Giugno 2021).

The Digeon News, <https://www.thedigeon.com>, (consultato Giugno 2021).

Rete clima, <https://www.reteclima.it>, (consultato Giugno 2021).

One Click LCA, <https://www.oneclicklca.com>, (consultato Giugno 2021).

Carbon Cure, <https://www.carboncure.com>, (consultato Giugno 2021).

EPD Italy, <https://www.epditaly.it>, (consultato Giugno 2021).

Studio essepi, <https://www.studioessepi.it>, (consultato Giugno 2021).

Simeonato Serramenti, <https://www.simeonato.com>, (consultato Giugno 2021).

Nextville, <https://www.nextville.it>, (consultato Giugno 2021).

# Ringraziamenti

Riccardo Greco

Dedico questo testo alle persone che mi hanno sostenuto e che hanno contribuito non solo a realizzare questa tesi ma anche ad alimentare la mia profonda passione per l'architettura.

Ringrazio prima di tutto il nostro relatore prof. Massimiliano Lo Turco, i correlatori prof. Paolo Scoglio, prof.ssa Francesca Thiebat e l'arch. Andrea Tomalini che hanno creduto nella nostra idea e ci hanno aiutato a svilupparla con grande professionalità.

Ringrazio i miei genitori per i loro incoraggiamenti e insegnamenti.

Un ringraziamento va al collega e amico Yasser, con il quale ho affrontato questo lavoro di ricerca, un'avventura affascinante e appassionante anche se svolta in remoto.

Un sincero grazie va a Stefano, Matteo e Dimitri i quali hanno messo a disposizione le loro competenze e strumenti per la realizzazione dei modelli di studio.

Un ringraziamento speciale va ai miei colleghi con cui ho condiviso l'intenso e bellissimo percorso universitario: Alessia, Andrea, Antonella, Benedetta, Debora, Delia, Edwin, Francesco, Livia, Lorenzo, Margherita, Martina, Nicola e Sabina di cui avrò un prezioso ricordo di questi anni. Grazie anche agli amici di sempre Alessandro, Claudio, Davide, Domenico, Gabriele, Gianluigi, Giulia, Lorenzo, Marco, Margherita, Matteo, Nicholas e Valeria.



## Mohamed Yasser Hariss

Dedico queste ultime righe alle persone che hanno permesso la realizzazione di questa tesi di laurea.

Vorrei innanzitutto ringraziare il nostro relatore, il prof. Massimiliano Lo Turco, per averci dato la possibilità di intraprendere questo percorso e per averci guidato lungo tutte le fasi di lavoro della tesi.

Ringrazio i correlatori, la prof.ssa Francesca Thiebat, il prof. Paolo Scoglio e l'arch. Andrea Tomalini, per la loro disponibilità e per il loro continuo supporto.

Un ringraziamento particolare va ai miei genitori, a mio fratello e a mia sorella, per essere sempre stati presenti, nonostante la lontananza, appoggiando ogni mia decisione e senza i quali non sarei mai potuto arrivare fino a qui.

Ringrazio il mio compagno di tesi, Riccardo Grecu, per aver creduto in me, per gli incoraggiamenti e per aver condiviso questi mesi impegnativi.

Un ultimo ringraziamento va ai miei amici e compagni di corso per essere stati presenti durante questi ultimi anni condividendo gioie e sofferenze. Grazie per aver fatto parte di questo lungo e indimenticabile percorso.

