



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Scuola di
Architettura

Corso di Laurea Magistrale in Architettura

ARCHITETTURA SIMBIOTICA

SYMBIOTIC ARCHITECTURE

STRUTTURE TEMPORANEE AUTOCOSTRUITE IN LEGNO E MICELIO

SELF-BUILT MYCELIUM AND TIMBER TEMPORARY STRUCTURES

Relatore

Prof. Giuseppe Ridolfi

Correlatori

Prof. Alberto Bove

Arch. Giombattista Areddia

Candidato

Luca Augusto Kaleva Ciccarese

Anno accademico 2020/2021

INDICE

ABSTRACT	5
1- PREMESSE	7
1.1-AUTOCOSTRUZIONE, COLLETTIVISMO ED ASSOCIAZIONISMO	8
LAB Laboratorio di Autocostruzione in Bambù - Collettivo ARK	10
Restauro e Costruzione di Muretti a Secco - Associazione Biodistretto di Montalbano	11
Allestimento esterno Copula Mundi 2019 - No Dump e Aps ICVCV	12
INBAR - Workshop di autocostruzione di tamponamenti in balle di paglia	13
INBAR- Workshop di autocostruzione di intonaci in cocchiopesto	14
INBAR- Workshop di autocostruzione di intonaci in terra cruda	15
1.2- AREA DI INTERVENTO E OBIETTIVI	16
Progettazione dal basso e Tactical Urbanism	17
Lo svuotamento delle città e la pandemia	18
Attrezzare il verde pubblico	19
L'associazione culturale No Dump	20
L'associazione di promozione sociale Icchè Ci Vah ci Vole	21
Eventi Promossi	22
Lumen: un contenitore creativo permanente	23
Il parco del Mensola	25
1.3- ARCHITETTURA E NATURA	28
La fine della modernità	29
Bioarchitettura e approccio antidisciplinare	31
Silk Pavilion - Mediated Matter Group	33
MARS Modular Artificial Reef Structure - Reef Design Lab	34
1.4- FUNGHI E NATURA	35
Biologia dei funghi	36
Il ruolo dei Funghi negli ecosistemi	41
2- IL MICELIO COME MATERIALE	43
I Biomateriali	44
Il micelio	45
2.1-CARATTERISTICHE DEL MATERIALE	46
Schiume e Pacchetti Compositi	47
Caratteristiche fisiche e meccaniche	48
Il micelio e l'economia circolare	51
Valutazione del ciclo di vita dei materiali a base di micelio	52

2.2- STATO DELL'ARTE	53
Hy-Fy - The Living.....	54
The Growing Pavilion - Company New Heroes & Dutch Design Foundation.....	55
The Shell Mycelium Pavilion - BEETLES 3.3 & Yassin Areddia Design.....	56
Myco Tree - Dirk Hebel & Philippe Block.....	57
2.3- ESPERIMENTI CON IL MICELIO	58
Progettazione degli esperimenti.....	59
Selezione della specie fungina.....	61
Selezione del substrato.....	63
4- CONCEPT	65
Il Padiglione.....	67
Shell Structures.....	68
Form-Finding.....	69
Tenciche di Form-Finding Digitali.....	71
5- ADD: ALGORITHM AIDED DESIGN	72
Il disegno come mezzo di comunicazione.....	73
Form-Finding e Disegno.....	74
Parametri: dalla logica additiva a quella associativa.....	75
Modellazione tramite algoritmo.....	76
6- IL PADIGLIONE	78
L'algoritmo di progetto.....	79
Da B-rep a Mesh.....	80
Form-Finding.....	81
Output.....	82
7- IL PANNELLO.....	83
Requisiti del pannello.....	84
Pannello 13.....	85
Modello di studio.....	86
Pannello 14.....	87
Pannello Finale.....	88
Modello di studio.....	89
L'algoritmo del pannello: i listelli.....	90
L'algoritmo del pannello: nodo interno.....	91
L'algoritmo del pannello: listelli di bordo.....	92
L'algoritmo del pannello: il micelio.....	93

8- IL NODO.....	94
Tipologie di nodo.....	95
L'algoritmo.....	96
Abaco dei nodi.....	98
Manifattura Additiva e Stampa 3d.....	99
9- IL PROGETTO.....	101
Esploso assonometrico.....	102
Schema di montaggio nodo-pannello.....	103
Dettaglio nodo N4.....	104
Dettaglio Appoggio.....	105
Configurazione per sala da concerti.....	106
Configurazione per cinema all'aperto.....	107
Configurazione per eventi sportivi e workshop.....	108
Fotoinserimenti.....	109
10- OTTIMIZZAZIONE STRUTTURALE.....	110
Struttura reale e modello.....	111
FEA: Analisi ad elementi finiti.....	113
I parametri.....	114
Strategie di ottimizzazione strutturale.....	116
Verifiche tensionali: prima iterazione.....	117
Verifiche tensionali: terza iterazione.....	118
Una seconda strategia: irrigidimento con EXTREN®.....	119
Il pannello irrigidito con profili EXTREN®.....	121
Analisi tensionale con EXTREN®: prima iterazione.....	122
Analisi tensionale con EXTREN®: terza iterazione.....	123
L'analisi Modale.....	124
Modi di vibrare: frequenze e periodi.....	125
11- ULTERIORI APPLICAZIONI.....	126
Lumen.....	127
Pensiline.....	128
Chillout.....	129
12- L'ARCHITETTURA SIMBIOTICA.....	130
CONCLUSIONI.....	131
BIBLIOGRAFIA.....	133
RINGRAZIAMENTI.....	135

ABSTRACT

Nei primi mesi del 2020 è stato inaugurato a Firenze il nuovo Parco del Mensola, inserito nell'ANPIL Torrente Mensola. Attualmente il Parco non è dotato di attrezzature e spazi d'ombra e costituisce un vuoto urbano difficilmente fruibile. Questa mancanza rappresenta un'opportunità per progettare interventi che rispondano alle necessità dei fruitori di un parco pubblico urbano. La progettazione è stata condotta seguendo logiche di Tactical Urbanism e principi di sostenibilità e economia circolare, con l'obiettivo di innescare dinamiche virtuose di cittadinanza attiva nel quartiere.

Si tratta di un tema che deriva dalle esperienze di autocostruzione, progettazione partecipata ed associazionismo che hanno arricchito il mio percorso di studi presso la Facoltà di Architettura di Firenze. In particolare il progetto di autorecupero dell'immobile Ex-Sert sito in prossimità del Parco del Mensola, presentato al Comune di Firenze con il nome di "Progetto Lumen", vede le associazioni di cui faccio parte, "No Dump" e "Io ch'è ci Vah ci Vole", protagoniste di un progetto per la creazione di un contenitore creativo permanente all'interno del Quartiere 2.

In fase di progettazione, è stato adottato un approccio interdisciplinare che ha permesso di sviluppare una tecnologia applicabile a coperture autoportanti, realizzabili in autocostruzione, sperimentando con materiali innovativi di origine biologica. Il materiale scelto sfrutta la capacità del micelio dei funghi di colonizzare substrati incoerenti di origine vegetale, dandogli coesione mediante il reticolo cellulare di polimeri naturali (cellulosa e chitina) di cui è costituito, creando un materiale dalle alte prestazioni termoisolanti, fonoassorbenti, idrorepellenti e ignifughe. Ai fini della progettazione in questa fase è stato cruciale condurre esperimenti sul materiale e sviluppare una tecnica di coltivazione e crescita dei materiali a base di micelio.

In the first months of 2020 the new Parco del Mensola, part of the Mensola Stream ANPIL, was opened to the public. Currently the Park presents no devices for the public to use and represents an urban void.

This lack of inner elements represents an opportunity to design objects capable of responding to the visitors' needs. The design process has been conducted pursuing principles of Tactical Urbanism, sustainability and circular economy, aiming to trigger virtuous dynamics of active citizenship in the neighborhood.

This theme is born from previous experiences of self-building, co-design and associationism that accompanied my studies of Architecture at the University of Florence. Particularly the project of self-renovation of the Ex-Sert building, presented to the Florence Administration with the name "Progetto Lumen", sees the associations of which I am a part of -No Dump and Io ch'è ci Vah ci Vole- as protagonists of a project that aims to establish a permanent creative hub in the Quartiere 2.

During the designing process an interdisciplinary approach has been adopted, which made it possible to develop a technology applicable to self-supporting roof structures while experimenting with innovative bio-materials. The chosen material uses the ability of mushrooms' mycelium to colonize inconsistent plant-based substrates, achieving cohesion through the network of natural polymers (cellulose and chitin) that forms the mycelium and thus creating a material of high thermal insulation, acoustic absorption, which is water repellent and fire retardant. It was crucial at this stage to experiment with the material to develop a technique of cultivation and growth of the mycelium-based material.

Parallelamente è stata condotta la progettazione di questi manufatti mediante processi di modellazione tramite algoritmi, implementando all'interno del software Grasshopper uno script che permettesse di applicare la tecnologia sviluppata ad un numero indefinito di configurazioni.

Modellando mediante algoritmo, è stato possibile testare la versatilità della tecnologia inoltre, tramite tecniche di form-finding digitale, si è definita una tipologia di manufatto che avesse un comportamento strutturale efficiente, assimilabile a Shell Structures. L'algoritmo è in grado sia di fornire in output modelli estremamente accurati degli elementi di giunzione tra pannelli, realizzabili mediante manifattura additiva (stampa 3d), sia di quantificare accuratamente i materiali necessari alla realizzazione delle strutture.

E' stata quindi definita una struttura a padiglione che costituisse un caso studio necessario all'implementazione dell'algoritmo, e rappresentasse l'obiettivo delle fasi di sperimentazione della tecnologia all'interno del progetto Lumen e del Parco del Mensola.

Sono state successivamente condotte analisi strutturali, mediante software di analisi ad elementi finiti, e le relative verifiche tensionali delle sezioni. In questo modo è stato possibile operare un dimensionamento degli elementi portanti della struttura, individuando due strategie: la prima che prevedesse elementi in solo legno di pioppo, mentre la seconda l'uso di un materiale di irrigidimento a base di fibre di vetro e resine.

Grazie a questa tecnologia è possibile immaginare un progetto capace di evolversi insieme al Parco del Mensola, alle realtà che vi opereranno e ai suoi fruitori, rispondendo in maniera fluida ai bisogni e ai cambiamenti, instaurando un rapporto simbiotico tra Natura, Uomo e Architettura.

Simultaneously these artifacts were designed through processes of algorithm modeling, developing a script within the Grasshopper software that made it possible to apply the technology to a large number of configurations.

Designing with algorithms made testing the versatility of the technology possible, and permitted to define structurally efficient artifacts through digital form-finding techniques, designing Shell Structures. The algorithm outputs highly accurate models of the connection elements between panels, which can be manufactured with additional technologies (3d printing). The algorithm gives an accurate quantification of the materials needed for the building process of these structures.

A pavilion structure has then been designed, so as to have a case study needed to implement the algorithm and to adopt as the final goal of a process of technology experimentation in the project Lumen and the Parco del Mensola.

Structural analysis has been conducted using a finite elements analysis software and the pertinent tensional verifications of the sections have been made. This way an optimization of the load bearing elements of the structure was undertaken, defining two strategies: the first providing a timber-only structure (poplar), while the second provides a conjunct stiffening material made with glass fiber and resins.

This technology makes it possible to vision a project capable of evolving with the Parco del Mensola and its visitors, while addressing the needs and changes with a fluid approach, thus forming a symbiotic relationship between Nature, Man and Architecture.

1- PREMESSE

1.1-AUTOCOSTRUZIONE, COLLETTIVISMO ED ASSOCIAZIONISMO

La volontà di avere un approccio pragmatico all'architettura, che permettesse di vedere gli effetti diretti che l'architettura può avere, mi ha spinto sin dai primi anni di università a sperimentare modi per costruire in prima persona. Immatricolatosi presso la Facoltà di Architettura di Firenze, ho sentito presto la necessità di applicare, per quanto possibile, quei principi che durante i corsi rimanevano purtroppo solo su carta.

Una prima fondamentale occasione per fare ciò fu la possibilità di partecipare ai workshop di autocostruzione organizzati dal collettivo di architettura Ark, di cui entrai a far parte pochi anni dopo. In queste occasioni sperimentai tecniche di costruzione in legno, costruzione in bambù, progettazione dal basso e partecipata e così naque il mio interesse verso l'autocostruzione.

Per autocostruzione si intende una pratica edilizia i cui principi fondamentali sono:

- L'uso di tecniche semplici;
- L'uso di materiali facilmente reperibili, possibilmente provenienti da fonti rinnovabili;
- Il basso costo.
- La collaborazione tra individui, lo scambio di conoscenze ed esperienze e la creazione di reti di rapporti tra le realtà sociali.

L'autocostruzione non solo permette a professionisti e futuri professionisti di approcciarsi in maniera diretta alle pratiche edilizie, essa costituisce infatti un'opportunità sotto vari aspetti:

La conservazione e riscoperta di tecniche e tipologie antiche. Il campo è quello dell'architettura informale o vernacolare. Siamo portati ad assimilare al concetto di Architettura solo una minima parte di ciò che è l'arte del costruire, ossia quella che possiamo definire Architettura "formale", che comprende una selezione piuttosto arbitraria di esempi storici. Col termine Architettura ci si riferisce solitamente all'Architettura dello Stato/Regno/Impero, quella delle istituzioni religiose, dell'aristocrazia, mai quella del popolo, delle tribù indigene, dei popoli nomadi. Eppure questo tipo di "Architettura senza Architetti", come la definisce lo scrittore Austro-Statunitense Bernard Rudofsky, è ricca e complessa, estremamente varia. Le pratiche dell'autocostruzione hanno il potenziale di riportare l'Architettura "formale" su un piano sicuramente meno elitario, con ripercussioni sull'intera filiera della progettazione, realizzazione e fruizione del costruito con nuove tipologie, nuove tecniche e nuovi scopi. Di primaria importanza sarebbe la riscoperta di tecniche quali le costruzioni in terra cruda, le costruzioni in bambù, le costruzioni in paglia. Queste tecniche si stanno riscoprendo negli ultimi anni e danno la possibilità di immaginare una Architettura più sostenibile a tutti i livelli, sui materiali, sulla produzione e sulla società.





La sperimentazione di nuove tecniche. L'urbanizzazione e la regolamentazione della pratica edilizia hanno portato ad un inasprimento delle normative sulle costruzioni; chiaramente questo ha il preciso obiettivo di rendere sicure le strutture, rendere salubri le città e proteggere il patrimonio storico e naturale da un'espansione caotica e senza limiti del costruito. Ciononostante, la scrittura di normative spesso troppo stringenti compromette la possibilità di sperimentazione nelle tecniche e nei materiali. La possibilità di condurre sperimentazioni tramite installazioni artistiche o strutture temporanee in piccola scala, come per questa tesi, può diventare un nuovo modo di testare nuove tecnologie o materiali finora mai immaginati, tenendo saldi i principi dell'auto-costruzione, svincolati dalla produzione industriale, relativi all'uso di materiali provenienti da fonti rinnovabili.

La creazione di una rete di relazioni sociali tra i partecipanti. Uno dei più grandi valori aggiunti dell'autocostruzione è la creazione di reti di persone che scambiano tra loro conoscenze ed esperienze: in un cantiere di questo tipo si instaura un rapporto di fiducia reciproca tra i partecipanti che scaturisce dalla condivisione della fatica, dei problemi e dei traguardi raggiunti. L'opportunità di sfruttare questo "effetto collaterale" non deve assolutamente essere messa in secondo piano, soprattutto quando l'autocostruzione viene applicata a processi che riguardano intere comunità. L'autocostruzione ha il potenziale di far innamorare le persone di un luogo, di un'esperienza, di un gruppo di persone. Tramite pratiche di autocostruzione potremmo ricostruire e rafforzare le comunità, riattivare luoghi abbandonati, instaurare pratiche virtuose di manutenzione, di tutela del patrimonio naturale, storico, artistico e architettonico, rimodulare la nostra società in modo da trasformare l'individuo da cittadino che passivamente usufruisce, nel bene e nel male, di ciò che la società offre, a membro cosciente della comunità, consapevole delle dinamiche interne, delle problematiche, dei punti di forza che caratterizzano la realtà che lo circonda. L'autocostruzione ha il potenziale di trasformare la società da Meccanismo quale è ora, controllato da un organo centrale, rigido ed incapace di rispondere ai cambiamenti, ad un Organismo dotato di un'intelligenza diffusa, capace di rispondere ad ogni eventualità, ad adattarsi, a trovare nuovi modi di risolvere problemi, proprio come nel Wood Wide Web, la rete di micelio che nelle foreste trasmette nutrienti e informazioni e mantiene l'equilibrio dell'intero sistema, decomponendo parti morte, processandole e reimmettendole nel sistema, a disposizione della nuova vita, proteggendo le parti malate e inibendo l'azione di quelle che cercano di prevaricare sulle altre.



LAB Laboratorio di Autocostruzione in Bambù - Collettivo ARK

Un Workshop organizzato dal collettivo Ark Kostruendo con lo scopo di promuovere e divulgare l'uso del bambù in campo architettonico e di offrire agli studenti dell'Ateneo Fiorentino l'occasione di approcciarsi a questo materiale. L'obiettivo è stato quello di condividere le conoscenze di alcuni esperti nel settore, che hanno presieduto un ciclo di lezioni teoriche che successivamente hanno permesso di sperimentare le tecniche costruttive attraverso la realizzazione di piccoli oggetti e di una struttura architettonica.

Nell'ambito del workshop, oltre alle questioni di tipo costruttivo e prestazionale legate al materiale, è stato affrontato il tema della corretta raccolta e stagionatura del bambù, avvenuta presso il Bambuseto di Viareggio, impresa di progettazione e realizzazione di strutture ed arredi in questo materiale.

Il workshop si è concluso con la realizzazione di una serie di elementi di arredo e coperture realizzate in bambù, testando varie tecnologie, dal puro bambù splittato ai culmi interi intelaiati con cordino e varie tipologie di nodo, al bambù intrecciato, ai culmi intelaiati tramite piastre, bulloni e controventate con cavi di acciaio.

L'interesse per l'uso del bambù ha caratterizzato negli anni molti dei progetti del collettivo Ark, permettendo di acquisire una certa dimestichezza che scaturisce dalle vaste possibilità che un materiale di questo tipo offre, dalle sue alte performance strutturali all'ottima lavorabilità, fino al bassissimo costo e vasta reperibilità anche sul territorio, perseguendo i principi dell'autocostruzione e della sostenibilità.



Restauro e Costruzione di Muretti a Secco - Associazione Biodistretto di Montalbano

L'Associazione Bio-Distretto del Montalbano viene costituita a Carmignano (Po) a Febbraio 2016, dopo un percorso durato tre anni, fatto di incontri e discussioni tra agricoltori, gruppi di acquisto solidale, docenti e semplici cittadini sensibili alla salute ed alla tutela ambientale e con tanta voglia e nostalgia di un Montalbano un po' più pulito, sano, bello e vitale.

Un movimento dal basso di persone e idee per attuare un cambio sia del modello organizzativo, sia come contenitore di progetti di coesione sociale e di miglioramento delle pratiche pubbliche già in essere. L'associazione Bio-Distretto del Montalbano intende adottare ogni iniziativa diretta a preservare e valorizzare la natura, l'ambiente, il territorio e paesaggio, con particolare riferimento all'ambito geografico del Montalbano.

Con questi obiettivi l'associazione si impegna a formare figure professionali in grado di costruire e mantenere il patrimonio costituito dai tracciati dei terrazzamenti agricoli in muratura a secco realizzati secondo le tecniche tradizionali, non solo per l'importanza che questi tracciati ricoprono per la salvaguardia del territorio, rallentando e contendendo l'azione di dilavamento delle acque piovane sui colli del Montalbano, ma preservando un patrimonio storico che da Dicembre 2018 è inserito nella lista del Patrimonio Culturale Immateriale dell'UNESCO.



Allestimento esterno Copula Mundi 2019 - No Dump e Aps ICVCV



Attraverso i materiali poveri e di recupero, No Dump cerca di valorizzare e far emergere l'identità dei luoghi, e offre la possibilità di agire attivamente sulla realtà quotidiana. Pone alla base del processo creativo la sperimentazione, intesa come sviluppo e realizzazione concreta di un'idea, trasformazione ed evoluzione dei materiali utilizzati, ricerca di nuovi modi di vivere lo spazio.

In occasione del Festival Culturale Copula Mundi 2019, organizzato dall'associazione ICVCV al parco delle Cascine, il gruppo allestimento ha ideato e realizzato, raccogliendo in autonomia il bambù necessario alla realizzazione, una serie di strutture in bambù e teli di cotone dove ospitare agli eventi esterni alla zona principale "Arena Q1".

Queste strutture avevano il compito di assicurare protezione dal sole estivo in occasione degli eventi sportivi previsti durante il Festival. La tecnologia si basa su treppiedi realizzati in bambù, intelaiati a travi legate tramite cordini. Il bambù è stato raccolto, seccato e stagionato in un bambuseto privato sito nei pressi di Firenze dallo stesso gruppo allestimento.

In occasione di questo allestimento, l'associazione No Dump, nata nel 2010 e composta da professionisti e studenti di Architettura, Design e Ingegneria provenienti da tutta Italia, è stata riattivata ed ha trovato un nuovo direttivo.



INBAR - Workshop di autocostruzione di tamponamenti in balle di paglia

Nell'autunno 2020 INBAR, Istituto Nazionale di Bio Architettura sezione Firenze, ha organizzato una serie di tre workshop relativi all' autorecupero di un immobile di pertinenza di una casa colonica risalente al sedicesimo secolo nel comune di Regello. I proprietari dell'immobile, volendo ristrutturare il manufatto di pertinenza della loro abitazione, hanno voluto seguire i principi della Bio Architettura e rendere partecipi gli interessati a questo intervento. La struttura dell'edificio, costituita da un solaio controterra in bio calcestruzzo, pareti in legno e copertura in legno lamellare, è stata realizzata da una ditta specializzata mentre il resto della costruzione, tamponamenti in balle di paglia, finitura esterna in cocchiopesto e finitura interna in terra cruda, sono state realizzate in autocostruzione da volontari.

Il primo incontro prevedeva la realizzazione dei tamponamenti in balle di paglia. La scelta di utilizzare soluzioni tecniche d'involucro con l'impiego di balle di paglia e finitura in argilla permette il raggiungimento di elevati valori di trasmittanza termica e buoni valori di sfasamento termico estivo. La composizione scatolare della struttura lignea è stata progettata in modo tale da accogliere filari di balle di paglia precedentemente compresse ed uniformate negli spigoli, in modo da assicurare un'alta densità e l'assenza di vuoti nel tamponamento. Gli archi delle aperture sono stati coibentati con paglia mista a barbotina, ovvero un impasto di terra argillosa e acqua. Negli incontri successivi, i residui prodotti col taglio delle balle sono stati utilizzati come materiale per la realizzazione delle finiture.



INBAR- Workshop di autocostruzione di intonaci in cocchiopesto

Il secondo incontro prevedeva la realizzazione della finitura esterna in cocchiopesto. La tecnica del cocchiopesto risale ai Fenici, ma fu ampiamente perfezionata dai Romani che utilizzavano il cocchiopesto come impermeabilizzante nel rivestimento di fondo, nelle vasche in muratura o nelle cisterne.

La tecnica si basa sull'uso della calce come legante, a cui viene eventualmente aggiunta una porzione di terra cruda, e ad una serie di aggregati quali sabbie e aggregati idraulicizzati come pozzolane, pomice, zeoliti o appunto, il cocchiopesto, ovvero laterizi ridotti in polvere. La qualità del cocchiopesto è in questo caso essenziale, l'uso di laterizi cotti a temperature inferiori ai 950 °C influisce positivamente sulla qualità del prodotto finito, e su questo si basa l'alta qualità delle malte a base di cocchiopesto realizzate in epoca romana.

Un ulteriore componente aggiunto in questo caso è stata una minima parte di paglia, recuperata dalle lavorazioni precedenti, che conferisce struttura alla malta. Il processo di carbonatazione della malta così costituita assicura un prodotto finito altamente performante. In questo incontro sono state applicate al tamponamento delle arelle in cannicci per assicurare l'aderenza della malta alla parete, che è stata poi applicata con cazzuola e frattazzo in più strati.



INBAR- Workshop di autocostruzione di intonaci in terra cruda



L'ultimo incontro ha visto la realizzazione delle finiture in intonaci di terra cruda. Quando si parla di terra cruda come materiale edile ci si riferisce a terre composte da inerti (pietre e sabbie) non reagenti con l'acqua e particelle più piccole di argilla, che a contatto con l'acqua plasticizzano assumendo così il ruolo di legante nell'intonaco.

La terra utilizzata, per i principi propri dell'autocostruzione e della bioarchitettura, è stata raccolta nell'intorno dell'immobile, avendo l'accortezza di raccogliercela da frane o scarpate in modo da avere una minore porzione di materiale organico ed un tenore più alto di argille. La terra, setacciata per eliminare gli inerti a granulometria maggiore, è stata bagnata e miscelata in betoniera con una porzione di paglia.

Gli intonaci in terra cruda, oltre ad essere un materiale completamente naturale e sostenibile, assicurano non solo inerzia termica, ma anche comfort acustico e grazie alla loro natura igroscopica, assicurano una bassa umidità interna della parete, oltre ad un grande valore estetico difficilmente raggiungibile con intonaci premiscelati.



1.2- AREA DI INTERVENTO E OBIETTIVI

Progettazione dal basso e Tactical Urbanism

Questo progetto di tesi nasce dalla necessità, più volte riscontrata durante l'attività di collettivo ed associazionismo, di progettare interventi a piccola scala che generino un cambiamento profondo nel modo in cui gli abitanti di un determinato luogo percepiscono lo spazio intorno a loro.

Tramite processi di Tactical Urbanism è possibile immaginare un'infinità di interventi temporanei generati dal basso, facilmente replicabili e scalabili, che siano intenzionalmente ideati e sviluppati al fine di istigare un cambiamento a lungo termine attraverso un processo di interazione con il sistema sancito di pianificazione e governo della città. Questo approccio al tema dello spazio pubblico nasce dall'esigenza ormai diffusa di ripensare il ruolo del progetto urbano come strumento di promozione del protagonismo degli abitanti, che abbia come obiettivo quello di trasformare in senso inclusivo la città, i cui spazi sono attualmente pensati, disegnati, organizzati e governati in funzione delle esigenze di un idealtipo di abitante poco rappresentativo della complessità reale delle nostre comunità.

Bisogna quindi ripensare il progetto urbano come processo e strumento a disposizione dell'abitante in modo tale che, oltre a pianificare la città attraverso politiche, piani e progetti a grande scala e a lungo termine, si possa garantire e favorire agli abitanti la reale possibilità di ri-progettare le città, micro-trasformando, co-gestendo e prendendosi cura degli spazi e dei servizi della città in cui vive, contribuendo consapevolmente e responsabilmente alla costruzione di scenari di sviluppo condivisi. La tecnologia sviluppata in questa tesi si propone come strumento e processo a servizio degli abitanti, che permetta loro di riappropriarsi della città, conoscendone limiti e possibilità d'uso, immaginando le trasformazioni possibili in modo da poterle rivendicare. Questo processo diventa inoltre strumento di cui i progettisti possono avvalersi per innovare e rendere più creativi, inclusivi ed intelligenti i progetti urbani, in particolare quelli alla scala di quartiere.

Lo svuotamento delle città e la pandemia

In questo anno di pandemia, abbiamo assistito allo sgretolamento quasi totale delle nostre comunità; l'impossibilità di trascorrere momenti di socialità ha reso evidente l'importanza che questi hanno nella coesione sociale e nella creazione e mantenimento di una comunità ricca ed inclusiva. L'ultimo anno ha di fatto accelerato il processo di svuotamento e morte degli spazi pubblici a cui abbiamo assistito negli ultimi decenni. Già nel 1970 il teorico dell'architettura Martin Pawley anticipava questo fenomeno nel suo libro "The Private Future", affermando come il declino della vita pubblica fosse contemporaneamente risultato e causa della privatizzazione. Più recentemente, il sociologo Richard Sennet descrive gli spazi pubblici inutilizzati come spazi asserviti alla circolazione di veicoli e delle persone, perdendo il ruolo di spazio in cui sostare; la morte degli spazi pubblici esprime un'idea ancora più perversa: ovvero che lo spazio debba essere progettato per il movimento, che lo spazio pubblico sia uno spazio da attraversare, dove non rimanere.

I fattori che determinano questo svuotamento degli spazi pubblici sono molteplici: in primo luogo la tendenza a concentrare le attività commerciali in centri dedicati al consumo, combinata alla diffusione della vendita tramite piattaforme digitali, causano la chiusura di piccoli negozi lungo le strade urbane e la conseguente decadenza della vita nelle strade. In secondo luogo, lo sviluppo di nuove tecnologie e l'uso sempre più diffuso di internet ha compromesso la necessità di interagire socialmente in maniera convenzionale, isolando gli individui in una socialità virtuale che li allontana dagli spazi pubblici, che prima dell'avvento dei social networks costituivano l'unico teatro delle relazioni sociali. La diretta conseguenza è che molte delle attività che tradizionalmente avevano luogo nello spazio pubblico sono state dirottate nella sfera privata, facendo in modo che i parchi e le piazze perdessero parte della loro funzione come spazi di incontro.

Attrezzare il verde pubblico

La perdita della funzione pubblica dello spazio compromette il potenziale sociale delle città, caratteristica di importanza fondamentale in un'epoca in cui la diversità culturale degli abitanti nelle nostre città è in continua crescita; lo spazio pubblico, inteso come teatro dell'abitare comune, ha il potenziale di insegnare ai suoi abitanti la tolleranza verso il diverso, al contrario la perdita di questo ruolo erode la coesione sociale e la possibilità di convivenza all'interno della città.

In questo scenario, il ruolo che lo spazio verde urbano può ricoprire è fondamentale. Ampi spazi verdi ben attrezzati, dove è possibile vivere in sicurezza la socialità possono farci tornare ad una nuova normalità, ristabilendo il ruolo fondamentale che lo spazio pubblico ha per le comunità, insegnandoci di nuovo a convivere con chi ci circonda. A Firenze questo cambiamento è già in atto, la pandemia ha portato sempre più persone ad usufruire del verde urbano quotidianamente, come riporta uno studio condotto dall'Agenzia Lama nel report "Firenze Prossima". Per il bene delle nostre comunità e per il bene del nostro patrimonio urbano, è assolutamente imperativo cogliere questa occasione di cambio di rotta, dove prima il verde urbano era percepito come un investimento a perdere, ora si prospetta la possibilità di renderlo protagonista della vita delle città.

L'associazione culturale No Dump

Le esperienze maturate col collettivo Ark hanno prodotto una visione dell'architettura come disciplina dal forte impatto sociale, grazie alla quale si può dare il via ad un cambiamento profondo del nostro modo di guardare a ciò che ci circonda. All'avvicinarsi della fine del mio percorso universitario, è apparso chiaro che l'esperienza con Ark doveva essere in qualche modo tradotta per poter essere portata nel mondo reale, fuori dalle mura della Facoltà di Architettura; la via intrapresa da me ed alcuni miei compagni di collettivo è stata quella dell'associazionismo. Seguendo le orme di altri ex-membri del collettivo Ark, in seguito alla partecipazione dell'allestimento del Festival Culturale Copula Mundi 2019, abbiamo riattivato l'associazione culturale NoDump, costituendo un nuovo direttivo nell'autunno 2020.

L'associazione culturale NoDump nasce nel 2010, operando sul territorio locale e nazionale facendosi promotrice di attività e progetti socio-culturali basati sulla sostenibilità ambientale. Gli eventi prevedevano la realizzazione di installazioni, componenti di arredo urbano, performance culturali e laboratori; a dieci anni dalla sua costituzione, l'associazione è stata riattivata rinnovandone gli obiettivi: la valorizzazione dell'esistente nell'ottica di risolvere problemi pratici che affliggono le comunità, utilizzando l'ingegno, l'impegno e l'improvvisazione creativa.

Il nome dell'associazione (No Dump in inglese significa "non buttare", "non sprecare") si riferisce proprio alla volontà di trasformare le nostre abitudini di consumo e di smaltimento attraverso la promozione di azioni di riciclo consapevole, rigenerando oggetti quotidiani che verrebbero altrimenti buttati. La creazione dell'oggetto in sé non è l'obiettivo finale, ma più il mezzo necessario per valorizzare e far emergere l'identità dei luoghi nei quali NoDump opera. L'adozione dei principi dell'autocostruzione favorisce la sperimentazione creativa, l'inventiva, l'acquisizione di nuove capacità e conoscenze che creano una stratificazione di saperi. L'approccio è quello della peer education, ovvero l'educazione tra pari, che fa leva sul legame tra similarità percepita e influenza sociale: sentire similarità con un'altra persona la rende un interlocutore credibile, accrescendo la probabilità che il nostro modo di pensare e di agire ne sia influenzato.

L'ideale che l'associazione NoDump propone è quello di una libertà basata sulla partecipazione attiva dei cittadini, guardando al lavoro collettivo come ad un momento di crescita e di confronto interpersonale e uno stimolo continuo all'ingegno e all'apprendimento.

L'associazione di promozione sociale Icchè Ci Vah ci Vole

Nel 2018 nasce l'Associazione di Promozione Sociale Icchè Ci Vah Ci Voleh (ICVVCV) dall'unione di quattro associazioni no profit con sede a Firenze: No Dump, Riot Van, Three Faces, UISP Comitato Territoriale di Firenze, e da singoli provenienti da altri enti attivi sul territorio locale. Attualmente è composta da 32 soci membri e da circa 40 giovani volontari prevalentemente under 35. L'associazione propone iniziative all'interno dello scenario urbano con la volontà di mantenere uno stretto legame con il territorio in cui opera, collaborando con realtà esterne (organizzazioni del terzo settore) i cui fini comuni sono la ricerca di nuovi metodi di integrazione sociale, che utilizzino l'arte e la cultura come strumenti per la partecipazione attiva alla vita della comunità. La collaborazione con organizzazioni civiche ben ramificate nell'immaginario collettivo fiorentino ha reso possibile la realizzazione di eventi a sostegno della comunità fiorentina, contribuendo ad alimentare percorsi virtuosi di socialità ed integrazione.

Essendo classificata come non profit, non disponendo quindi di fondi in esubero da investire, l'associazione ha sviluppato negli anni diverse modalità di copertura finanziaria degli interventi:

- Bandi pubblici di finanziamento ad attività sociali e/o culturali promossi da enti locali, amministrazioni comunali e privati;
- Sponsor tecnici e media partner (che in cambio dell'erogazione di servizi e/o risorse materiali, richiedono promozione durante gli eventi in cui sono coinvolti).

Eventi Promossi

Icchè Ci Vah Ci Voleh Festival

La prima edizione risale al 2011 dalla volontà dei suoi organizzatori di creare uno spazio urbano temporaneo che permettesse alle realtà giovanili emergenti attive sul territorio di esprimersi, proponendo nuovi metodi di apprendimento e di governance ispirate dalla trasmissione di conoscenze con logica bottom-up. Il festival ospita performance di arte, musica, teatro, danza, workshop e laboratori gratuiti.

L'obiettivo è quello di incanalare le energie del territorio in modo da ottenerne benefici per la comunità di riferimento, fornendo alle giovani realtà un'occasione di visibilità e di creazione di una rete di contatti e competenze condivise e strutturate. La scelta degli spazi ricade su quei luoghi che hanno bisogno di riqualificati e valorizzati attraverso l'uso e la diffusione di "buone pratiche" innovative.

Copula Mundi, Festival Sperimentale per la creazione di Immaginari Condivisi

Naturale evoluzione del festival ICVCV, il Copula Mundi nasce nel 2018 con la nuova A.P.S., come progetto culturale di ampio respiro. Il nome riprende la filosofia umanistica di Marsilio Ficino: Copula Mundi individua l'uomo come termine medio tra il divino e il terreno, la sua anima come Copula, entità attraverso cui divino e terreno si incontrano. Il festival si propone come "unificazione del mondo": diversi universi culturali si fondono in uno stesso ambiente in un moto circolare che connette il tutto in unità.

L'intento degli organizzatori è quello di creare uno spazio temporaneo e adattivo capace di esaltare l'eterogeneità dei diversi linguaggi espressivi in esso apportati, utilizzando l'alterità come strumento di crescita personale e collettiva. Copula Mundi è un festival culturale fiorentino gratuito, itinerante di performance di arte, musica, teatro, danza, workshop e laboratori. Il festival vuole essere un momento di sintesi e confronto, teatro di artisticità affermate, nascoste o che non hanno mai avuto l'opportunità di esprimersi, occasione per collaborare tra temi e realtà diverse che permette l'incontro di nuovi modi di vedere la realtà e di rapportarsi con essa. Attraverso il coordinamento di artisti, performer e attività interattive e il coinvolgimento diretto della cittadinanza è nato un evento all'insegna della partecipazione sociale, fortemente legato al territorio: rivolto agli abitanti della città nella micro scala del quartiere, con l'intento di restituire loro questi luoghi trasformati, migliorati e vissuti in maniera diversa. Un nuovo scenario che possa portare nel futuro ad una visione differente di questi spazi, non come vuoti ma come aree ricche di potenziale e soprattutto di vita.



Lumen: un contenitore creativo permanente

A seguito della seconda edizione nel 2019 del Festival Copula Mundi (per cui a maggio è stato insignito del premio In/Architettura 2020 per la Toscana) gli organizzatori del Festival e le realtà culturali ad esso connesse hanno cominciato ad immaginare uno spazio fisico permanente nella periferia di Firenze: un contenitore creativo per il quartiere dove condividere conoscenze, uno spazio permeabile alla comunità che lo accoglie, che si ponesse in continuità alle esperienze precedenti.

L'occasione per concretizzare questa visione si è presentata con l'edizione 2020 dell'Estate Fiorentina, una rassegna annuale promossa dal Comune di Firenze nell'arco di sei mesi, da maggio fino a ottobre, che prevede l'erogazione di finanziamenti da parte dell'amministrazione comunale per lo svolgimento di eventi e attività culturali nei cinque quartieri della città, recependo le proposte progettuali presentate da tutti i soggetti senza scopo di lucro tramite domanda di partecipazione.

A differenza delle edizioni precedenti, quella del 2020 ha previsto un secondo avviso dedicato a pianificazioni di durata triennale. L'opportunità è stata colta dagli organizzatori del Copula Mundi, progettando un centro di aggregazione socio-culturale in grado di ospitare le attività di cui questa rete di persone si è fatta promotrice da collocare in una zona della città che necessita di percorsi di socializzazione.

L'idea alla base è quella di creare un contenitore creativo per il quartiere basato sulla progettazione partecipata e la condivisione di risorse ed esperienze, ponendo al centro lo sviluppo sociale, economico e urbano che sia sostenibile, strutturando dei percorsi collettivi che mettano i cittadini, soprattutto i più giovani, al centro di un percorso di rigenerazione urbana.

Gli obiettivi del progetto di autorecupero presentato al comune sono:

- Promuovere un progetto di autorecupero dello stabile, delle serre e dello spazio aperto residuale attraverso l'utilizzo di materiali ecocompatibili e attraverso pratiche di sostenibilità ambientale che incrementino l'efficiamento energetico;
- Valorizzare il carattere storico documentale dello stabile attraverso un recupero che mantenga le sue caratteristiche peculiari;
- Strutturare, con l'ausilio di università e partner privati, un percorso formativo teorico e pratico di lezioni e workshop che permettano l'analisi dell'esistente, lo studio di metodologie e tecniche di intervento e la relativa realizzazione;
- Essere laboratorio di innovazione e sperimentazione nei temi legati all'ecologia e alla sostenibilità.



Il progetto Lumen prende forma all'interno del Quartiere 2 a ridosso del Parco del Mensola, di recente realizzazione, nella periferia sud di Firenze. Al civico 25 di Via del Guarlone sorge un immobile di proprietà comunale, dove fino a pochi anni fa aveva sede il Centro Territoriale il Guarlone, struttura socio-riabilitativa SERT gestite dall'Azienda USL Toscana Centro. L'immobile secondo la descrizione catastale è costituito da un edificio su due piani in muratura e dal relativo spazio di esterno di pertinenza; allo stato attuale tanto l'immobile quanto lo spazio esterno versano in stato di abbandono e necessitano di essere rifunzionalizzate. Nella parte esterna, zona di particolare interesse nell'ambito di questa tesi, sono collocate due serre abbandonate e prive di tamponamento, le cui condizioni richiedono un intervento di recupero che ne preveda l'efficientamento.

È in quest'area che si inserisce la richiesta di concessione trentennale dello spazio di via del Guarlone al Comune di Firenze, presentata a settembre 2020 da Icché ci vah ci vole A.P.S. La domanda di concessione prevede la strutturazione di un nuovo polo aggregativo in città, che nel corso dell'anno fungerà da "porta di ingresso" al parco del Mensola, mentre d'estate costituirà la sede permanente del Copula Mundi festival. Un investimento in termini temporali ed economici nell'area consente di intercettare le necessità del territorio; tutto ciò si traduce in nuove prospettive di integrazione, condivisione, sviluppo culturale, sostegno e ascolto.

L'approccio utilizzato dalla rete di attori coinvolti prevede fin da subito la ricerca di modelli di sviluppo sostenibile finalizzati sia all'efficientamento degli spazi in termini di prestazioni energetiche (in primis attraverso l'utilizzo di fonti rinnovabili e materiali di recupero) sia al ripensamento dello spazio pubblico in funzione collettiva, favorendone un utilizzo versatile che sostiene e amplifica le esperienze di socialità.

L'immobile dove il progetto Lumen prende forma costituisce ai fini di questa tesi uno spazio di sperimentazione, dove la tecnologia verrà realizzata in scala sempre maggiore per capirne l'effettiva fattibilità, recependo quelli che sono gli obiettivi che l'associazione ha presentato al comune per il progetto di autorecupero dello stabile e dello spazio verde di pertinenza. I primi interventi riguarderanno piccoli manufatti progettati secondo le necessità dei partner culturali che partecipano al progetto Lumen. Questi primi manufatti saranno costituiti da un numero congruo di pannelli e nodi e permetteranno di comprendere le potenzialità e le problematiche della tecnologia.

Citando il progetto presentato: "Andremo ad intervenire inoltre, secondo un processo incrementale, nello spazio aperto con la costruzione di strutture temporanee che possano, nel tempo, risultare reversibili e modificabili a seconda delle necessità di utilizzo. Anche in questo caso cruciale rimane la scelta della tecnologia e l'attenzione al reperimento ed all'utilizzo di materiali che si riconducono ad un approccio al progetto di economia circolare.

Per quanto riguarda invece i manufatti come depositi e tettoie, così come consentito da regolamento urbanistico, è previsto, in linea con gli interventi all'edificio, il loro rifacimento secondo un modello sostenibile.

Tecnologie ecocompatibili come terra cruda, paglia e canapa possono essere alcune delle soluzioni per convertire le pertinenze dal loro attuale stato di degrado a occasione per un laboratorio formativo di sperimentazione."

In quest'ottica questo progetto di tesi si adegua totalmente alle specifiche del progetto presentato e verrà applicato all'interno degli spazi ricevuti in concessione dal Comune di Firenze.

Il parco del Mensola

Il progetto Lumen intende attivare dinamiche virtuose di partecipazione alla vita della comunità in vista di una rigenerazione sociale ed urbana nel Quartiere 2 di Firenze. Questo intervento si pone in rapporto stretto col nuovo Parco del Torrente Mensola di recente apertura; il parco comprende circa 18 ettari tra via Gabriele D'Annunzio (località "Ponte a Mensola") e via della Chimera.

Il progetto del Parco del Mensola viene definito dall'ente a cui è stato affidato l'incarico, il Consorzio di Bonifica 3 Medio Valdarno, come progetto "integrato", trattandosi di un intervento che persegue finalità idrauliche, ambientali, paesaggistiche e sociali-ricreative. Gli scopi principali dell'intervento sono:

- Mitigazione del rischio idraulico delle aree urbane limitrofe al Torrente Mensola, attualmente esposte a fenomeni di allagamento per eventi meteorici intensi;
- Inserimento di interventi di mitigazione del rischio idraulico nel contesto del Parco Urbano del Mensola, previsto dagli strumenti di programmazione del Comune di Firenze nell'ambito della più estesa ANPIL del Torrente Mensola;
- Miglioramento dello stato ecologico del corso d'acqua al fine di tutelare ed incrementare gli ecosistemi e la biodiversità in linea con gli obiettivi della Direttiva 2000/60/CE.

L'elemento più caratterizzante di questo intervento è stata la creazione, attraverso la modellazione morfologica dei terreni, di tre opere di laminazione per le acque di piena del Torrente Mensola: l'area di espansione denominata "D'Annunzio" e due casse d'espansione "strutturate", ossia costituite da un generale abbassamento del piano di campagna, da argini perimetrali in terra inerbita che ne racchiudono e delimitano la superficie ed il volume di invaso e da sfioratori di presa e di sicurezza realizzati in scogliere di massi in pietrame, la prima denominata "Torre" di circa 3 ettari e la seconda denominata "Guarlone" di circa 8 ettari. La morfologia di queste aree presenta zone con diverse periodicità di allagamento a seconda della loro quota di ubicazione.

Inoltre l'intervento ha previsto un generale allargamento della pertinenza fluviale del torrente in modo da ampliare la fascia riparia, che sarà interessata anche dalla piantumazione di essenze arboree quali Quercus Robur, Quercus Pubescens, Alnus glutinosa ecc. in modo da favorire ed accelerare l'irrobustimento delle fasce boscate di ripa.

Da questo intervento scaturisce la creazione di una vasta area adibita a "Parco del Mensola", coincidente con la porzione di territorio acquisita, oltre ai terreni già di proprietà comunale, e comprendente sia la pertinenza fluviale sia le opere di laminazione. Il parco è delimitato a monte e a valle da due aree adibite a nodi di ingresso-uscita dal parco, che verranno in futuro opportunamente attrezzate per una maggiore fruibilità pubblica. Il Parco del Mensola rappresenta dal punto di vista urbanistico una cerniera di alta qualità tra il territorio agricolo collinare e la città espansa.

All'interno del parco è prevista la realizzazione di una consistente rete di percorsi pedonali costituiti da tracciati più lineari (denominati "percorso urbano") con finalità di mobilità dolce e realizzati a quota sicura da allagamenti, e da tracciati con connotato maggiormente naturalistico-escursionistico (denominati "percorso silvano") localizzati in aree limitrofe al torrente e soggetti a fenomeni di allagamento più frequenti. La percorrenza pedonale attraversa il Mensola in due punti: su via del Guarlone sfruttando il promiscuo ponte esistente e ad a monte di via della Torre con una nuova passerella di progetto.

Lo stato attuale del Parco vede una totale assenza di quei connotati che rendono uno spazio verde pubblico fruibile: l'impianto delle alberature finora operato non assicura riparo dagli agenti atmosferici, e si dovranno probabilmente aspettare decenni prima che le nuove alberature raggiungano una dimensione adatta a questo scopo; il parco manca inoltre completamente di attrezzature quali panchine, pensiline o zone di sosta. Queste mancanze rischiano di compromettere la fruibilità del Parco e di renderlo, in quanto luogo puramente di passaggio in cui è difficile sostare, un vuoto urbano. Ho voluto guardare a queste mancanze come ad un'opportunità per adottare un approccio diverso alla progettazione delle attrezzature all'interno del parco, che rispondessero ai bisogni primari di comfort e che rappresentassero dei catalizzatori in cui i fruitori potessero individuare luoghi di aggregazione dove instaurare rapporti sociali, abitando lo spazio pubblico e ricostruendo le fratture che l'ultimo anno di pandemia ha creato nel tessuto sociale delle nostre città.

Obiettivo: un progetto in evoluzione

L'obiettivo è quello di sviluppare una tecnologia che possa essere applicata a varie tipologie di manufatto, ascrivibili all'interno di un progetto fluido che si evolva insieme al Parco del Mensola, rispondendo alle esigenze in cambiamento a seconda delle stagioni, dell'impianto e della crescita delle alberature e ai bisogni dei fruitori.

Per questo motivo ho redatto un piano triennale che prevede la progettazione di una serie di strutture da posizionare all'interno della cassa di espansione "Guarlone", assimilabile al momento ad un vuoto urbano dove le alberature, di nuovo impianto e ancora non ben stabilite, non assicurano riparo e non definiscono lo spazio.

Questo piano triennale prende in considerazione non solo la crescita degli alberi, ma anche le diverse esigenze dei fruitori, che abitando ed usufruendo del parco diventeranno protagonisti dell'atto progettuale tramite strategie di progettazione dal basso.

Per definire una tecnologia di questo genere, è stato necessario definire una struttura di studio di un certo grado di complessità, che permettesse di implementare la tecnologia, l'algoritmo che la definisce, ed operare analisi strutturali e di dimensionamento.

anno 1

anno 2

anno 3

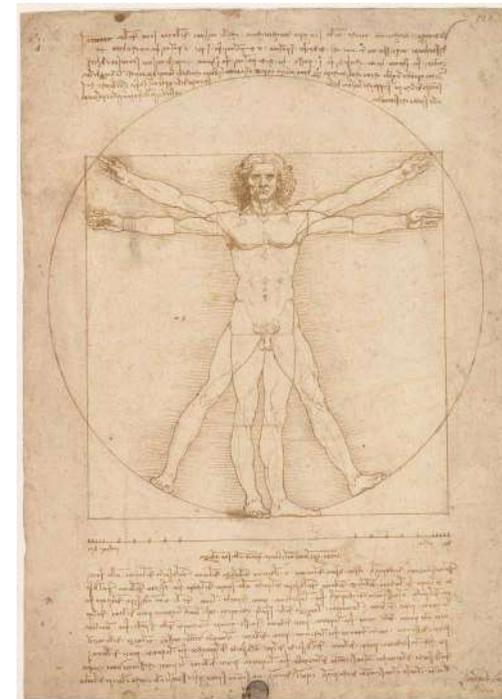
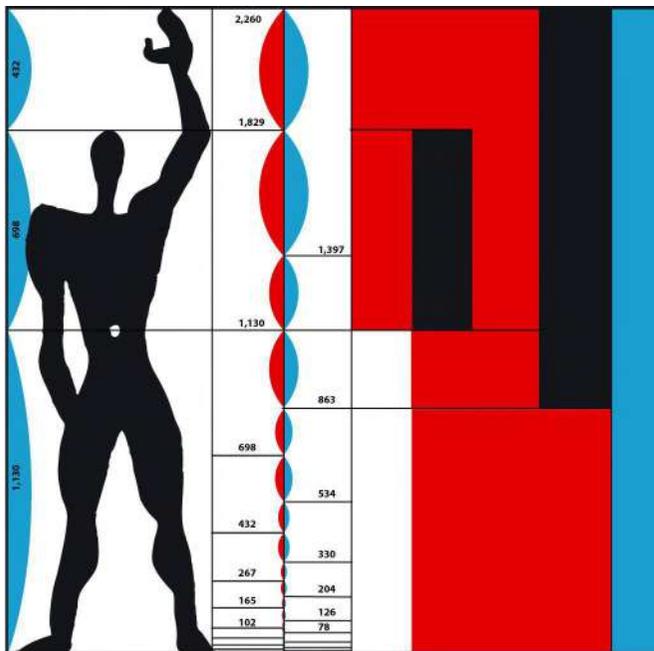
1.3- ARCHITETTURA E NATURA

La fine della modernità

Fino ad ora, il nostro approccio alla progettazione è stato quello di sostituzione, espansione o miglioramento delle funzioni umane; gli oggetti, gli strumenti, gli spazi che fino ad ora abbiamo concepito e realizzato hanno sempre avuto una dipendenza protesica con l'uomo ed il suo corpo.

La fine del medioevo è stata sancita dall'abbandono nel mondo occidentale della visione teocentrica che aveva caratterizzato la cultura antica e quella medioevale, sostituendola con un umanesimo, espresso da Leonardo da Vinci col suo Uomo Vitruviano e che perdura fino ai giorni nostri con Le Corbusier ed il suo Modulor, caratterizzato da un'idea antropocentrica secondo cui l'obiettivo dell'uomo è quello di manipolare la materia per adattarla a sé, e non viceversa.

Gli edifici che abitiamo, gli strumenti che utilizziamo, sono specchio di questo nostro approccio e ricalcano la struttura del nostro corpo. Cosa sono le posate con cui mangiamo se non una protesi delle nostre mani? Così i vestiti che utilizziamo non sono forse una replica della nostra pelle? E gli edifici che costruiamo con tanta cura non sono forse rappresentazioni materiali della nostra psiche, ovvero proiezioni della nostra architettura mentale e quindi specchio conscio ed inconscio di noi stessi?



Uno degli oggetti più importanti del nostro tempo, il computer, che in meno di un secolo ha sconvolto la nostra visione della realtà, non è altro che un tentativo di ricreare noi stessi, potenziando alcune nostre caratteristiche (essenzialmente le capacità e la velocità di calcolo) e sopprimendone altre (la necessità di riposo e l'emotività). In esso possiamo osservare la nostra struttura: il processore come il cervello che governa l'hardware, ossia il corpo, ed i dischi rigidi, i banki RAM, le schede video e audio, che altro non sono che gli "organi" della macchina, i nostri organi trasposti in chiave sintetica.

Perfino le nostre società sono costruite su questo modello arcaico, gerarchico e centralizzato, il cui vantaggio è di certo quello di fornire risposte rapide, ma che per sua costituzione è fragile e sensibile ai cambiamenti.

Sul concetto di epoca moderna ha forse fatto chiarezza più di tutto la teoria di Hans Blumenberg, secondo cui la modernità non sarebbe caratterizzata semplicemente dalla secolarizzazione di istanze teologiche medievali, ma segnerebbe la produzione di un vero e proprio stato di coscienza, un intero nuovo modo di concepire il mondo e il ruolo che l'Uomo gioca al suo interno. Se il medioevale poteva ancora intendere il mondo come un kosmos, un ordine imperituro e organizzato per il conseguimento di fini etico-teologici (la provvidenza divina), per il moderno il mondo diviene un ammasso di materia inerte, disponibile per l'organizzazione e la sottomissione ai fini umani: «Il medioevo finì quando, all'interno del suo sistema spirituale, esso non poté più conservare per l'uomo la credibilità della Creazione come provvidenza, e quindi gli addossò l'onere della sua autoaffermazione».

Questo mutamento non è unicamente di tipo conoscitivo, ma sconvolge profondamente la modalità che l'uomo moderno utilizza per affrontare le sfide quotidiane della vita, nonché per intendere se stesso. Sempre per Blumenberg, infatti l'uomo pre-moderno avrebbe visto se stesso come «un essere ben fornito dalla natura, ma che fallisce nella distribuzione dei suoi stessi beni»: una concezione per la quale «le abilità e le prestazioni tecniche dell'uomo potevano avere solo una funzione complementare, di sussidio alla natura, di esecuzione della sua funzionalità».

La perdita dell'ordine teologico medievale sarebbe alla base di quel nuovo spirito di autoaffermazione tramite le capacità razionali, che dona alla modernità il suo carattere peculiare e tuttavia è causa di quel processo di ipertrofia dei mezzi tecnologici che ha accompagnato questa epoca fino ai nostri giorni: «La crescita del potenziale tecnico non è solo la prosecuzione, anzi, non è nemmeno l'accelerazione di un processo che abbraccia l'intera storia dell'umanità. La moltiplicazione qualitativa delle prestazioni e delle risorse tecniche si può derivare piuttosto solo da una nuova qualità della coscienza. Nella crescita della sfera tecnica vive una volontà che affronta consapevolmente la realtà estraniata, una volontà di conquistare una nuova umanità di questa realtà».

L'uomo moderno, emancipato dalla visione provvidenziale del mondo, si trova finalmente libero di scatenare il suo potere di affermazione sul mondo e di miglioramento della propria condizione, ma, paradossalmente, la perdita dell'ordine provvidenziale significa essere proiettati in un mondo concepito adesso nella luce della perenne scarsità e dell'ostilità nei confronti dell'uomo. Lo sviluppo dei mezzi tecnici è quindi mezzo per guadagnare una prosperità sempre maggiore in un mondo adesso ostile.

Se la filosofia della storia di Blumenberg è così interessante per la descrizione dello spirito moderno, ciò è anche perché la modernità si trova oggi di fronte ad una crisi dei suoi presupposti. La prosperità nel mondo sviluppato è in declino, mentre l'intera umanità sta entrando in un periodo di crisi senza precedenti: cambiamento climatico, perdita rapidissima della biodiversità, esaurimento delle risorse, esplosione delle disuguaglianze economiche, erosione dei rapporti sociali. Il secolo scorso ha anche segnato una corsa agli armamenti nucleari che, nel caso venissero impiegati in una nuova guerra mondiale, potrebbero facilmente segnare l'estinzione della nostra specie.

È ormai evidente che un'autoaffermazione illimitata dell'uomo sul mondo naturale non può realizzarsi sul lungo corso. È arrivato il momento di aprirsi in tutti i campi a nuove idee, che mettano uomo e natura in un rapporto non più oppositivo, ma simbiotico, superando le contraddizioni che l'epoca moderna recava in sé dall'inizio, e che adesso sono diventate fin troppo evidenti.

Bioarchitettura e approccio antidisciplinare

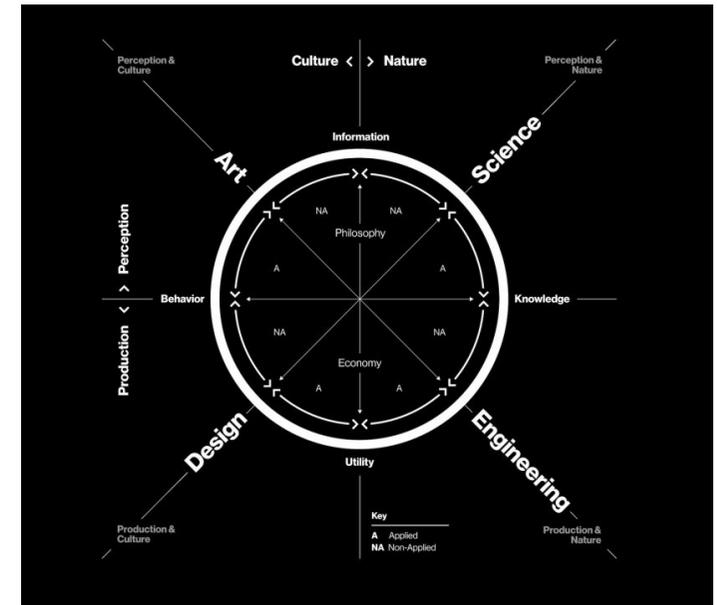
La nostra visione del mondo è tuttora caratterizzata da un approccio dualistico: il sintetico si contrappone all'organico, la macchina all'organismo, il binario al biologico, la cultura alla natura, il montaggio alla crescita.

Negli ultimi decenni una branca della progettazione si è allontanata dall'era della macchina, perseguendo una nuova era di simbiosi tra noi, i prodotti che utilizziamo e gli edifici che abitiamo, ricercando nuove soluzioni ispirate alla natura. Un approccio di questo tipo segue l'idea, formatasi all'alba del nuovo millennio, di "anti-disciplinarietà", ipotizzando una visione olistica delle interrelazioni tra le quattro discipline dell'esplorazione creativa: Scienza, Ingegneria, Design e Arte.

L'ipotesi anti-disciplinare parte dal presupposto che la conoscenza non possa più essere ascritta o prodotta all'interno di confini disciplinari, ma debba bensì aspirare ad una loro compenetrazione. Questo approccio può essere sintetizzato da una mappa delle interrelazioni tra i quattro domini, dove una disciplina può stimolare un'evoluzione nell'altra e un singolo individuo o un singolo progetto possono risiedere in molteplici domini.

Nel 2016 Neri Oxman ha realizzato questa mappa delle interrelazioni, chiamata "Il ciclo di Krebs della Creatività", ispirata al ciclo di Krebs, che rappresenta i cicli metabolici cellulari che tramite l'ossidazione dei nutrienti producono energia chimica trasmessa attraverso la cellula sotto forma di Adenosina Trifosfato (ATP).

Il ciclo di Krebs della Creatività (KCC) è una mappa che descrive la perpetuazione dell'energia creativa nelle quattro modalità di creatività umana: Scienza, Ingegneria, Design e Arte, dove ogni modalità produce energia trasformandosi in un'altra modalità. Il ruolo della Scienza è quello di spiegare e prevedere il mondo che ci circonda, "convertendo" informazioni in conoscenza. Il ruolo dell'ingegneria è quello di applicare la conoscenza scientifica per sviluppare soluzioni a problemi empirici, "convertendo" la conoscenza in utilità. Il ruolo del Design è di produrre oggetti fisici che rappresentino soluzioni che massimizzino la funzione ed aumentino l'esperienza umana, "convertendo" l'utilità in comportamento. Il ruolo dell'Arte è quello di mettere in discussione il comportamento umano e di sviluppare consapevolezza del mondo che ci circonda, "convertendo" il comportamento in nuova percezione delle informazioni, ripresentando i dati introdotti all'inizio del ciclo come informazioni per la Scienza.





Un approccio olistico alle discipline è possibile perché in questo momento storico ai progettisti viene data l'opportunità di utilizzare strumenti mai immaginati prima d'ora:

- La progettazione computazionale, che permette di generare forme complesse usando semplici algoritmi;
- La produzione additiva, che permette di produrre parti aggiungendo materiale invece che sottraendolo da un pezzo unico;
- L'ingegneria dei materiali, che permette di progettare materiali ad alta risoluzione;
- La biologia sintetica, che permette di progettare nuove funzioni biologiche modificando il DNA di determinati organismi;

Se il futuro della progettazione è quello di instillare la vita negli oggetti e negli edifici che ci circondano, di generare una vera e propria ecologia dei materiali, allora i progettisti devono unire due mondi distinti, la macchina e l'organismo.

Si assiste così alla redazione di progetti dove tecnologie avanzate quali la produzione additiva e la biologia sintetica vengono affiancate a tecniche costruttive tradizionali, esplorando nuovi modi di concepire gli oggetti che creiamo. Dalla corteccia degli alberi agli esoscheletri dei crostacei, dai bozzoli dei bachi da seta alle barriere coralline, nuovi materiali si fanno largo nei progetti di architetti e designers; nascono così nuovi modi di pensare ai materiali, agli oggetti, agli edifici ed alle tecniche costruttive, e nuovi campi per collaborazioni interdisciplinari e, addirittura, interspecie. Dal lavoro nei campi dell'arte, dell'architettura e del design di questi progettisti si definisce questo nuovo approccio, definito da una dei suoi massimi esponenti, Neri Oxman, come "Ecologia dei Materiali": una commistione di scienza dei materiali, tecnologie di produzione digitali e design organico, capace di creare nuove possibilità per il futuro.

Silk Pavilion - Mediated Matter Group



Ispirata dalla capacità dei bachi da seta di generare un bozzolo tridimensionale da un filamento di seta, la geometria di questo padiglione è stata creata utilizzando un algoritmo che definisce la densità dell'intreccio di un singolo filamento di seta intrecciato su telai metallici.

La variazione della densità è stata quindi definita dai bachi stessi, usati in questo caso come stampanti 3d naturali, in una seconda fase di creazione della struttura. Circa 6.500 bachi da seta sono stati posizionati sul bordo inferiore del telaio creando intrecci piani di seta non filata, riempiendo i vuoti tra i filamenti intrecciati da una macchina CNC. Dopo la loro incubazione, i bachi da seta sono stati rimossi e liberati.



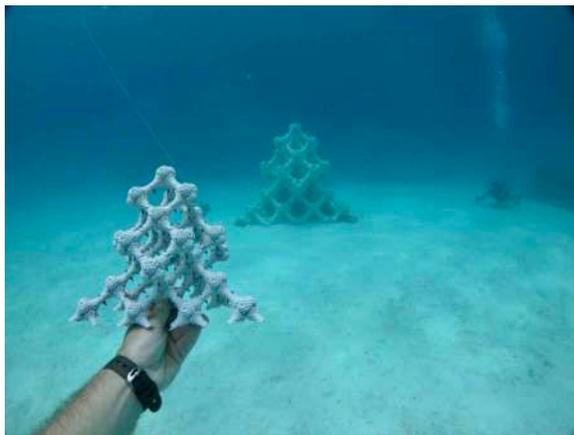
MARS Modular Artificial Reef Structure - Reef Design Lab

In uno sforzo globale per tutelare e ristabilire le barriere coralline, ormai quasi completamente distrutte a causa dell'azione devastante dell'uomo sugli ecosistemi, causata dall'acidificazione e riscaldamento degli oceani, la pesca distruttiva e le specie invasive, il Reef Design Lab ha immaginato un nuovo metodo per creare vere e propri allevamenti sottomarini di corallo.

Il progetto è costituito da strutture reticolari spaziali che possono essere posizionate in situ da piccole imbarcazioni ed assemblate da sommozzatori. Questa tecnologia elimina la necessità di attrezzature pesanti (spesso non disponibili in luoghi remoti) permettendo la costruzione di strutture resistenti utilizzando un apporto di materiale minimo.

Ogni struttura ha una speciale morfologia che promuove la crescita del nuovo corallo e permette l'innesto di corallo allevato. Queste superfici sono stampate tramite tecnologia additiva in ceramica tramite tecnica di colata a impasto umido. Gli elementi cavi vengono poi riempiti di calcestruzzo armato marino.

Una volta costruito, il sistema costituisce una struttura rigida permanente su cui è possibile innestare il corallo e che costituisce un habitat adatto anche ad altre specie autoctone. Il progetto MARS è tuttora in fase di sviluppo e costituisce una soluzione valida per diverse applicazioni e diversi ecosistemi.

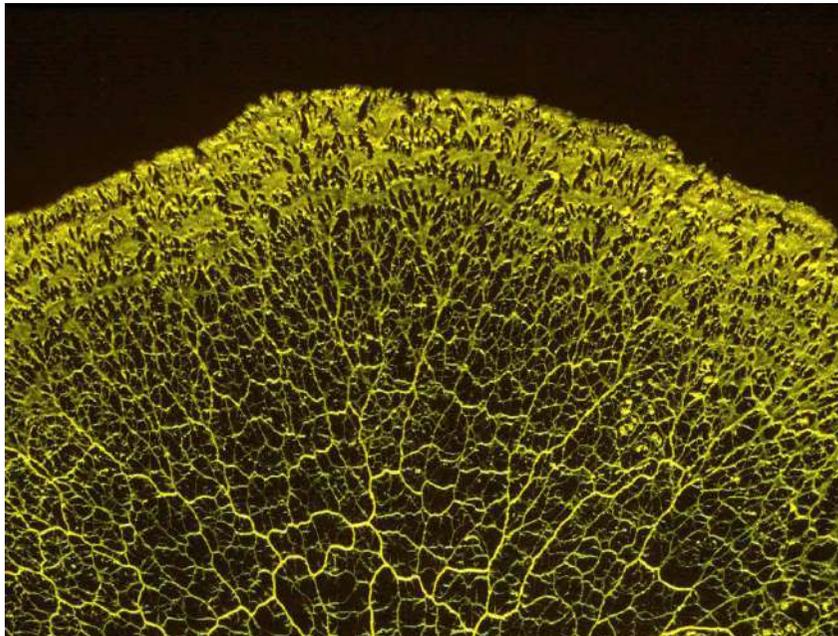
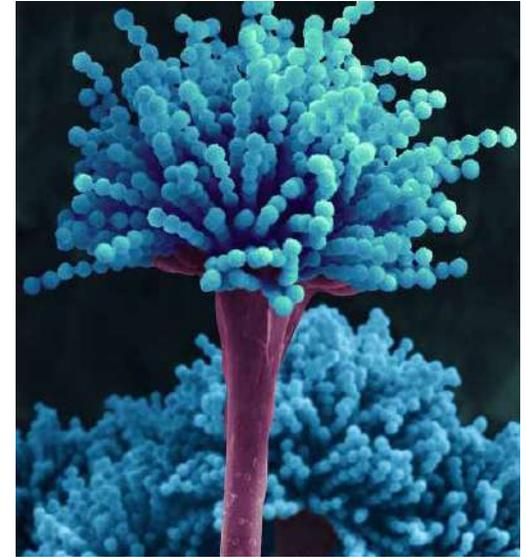


1.4- FUNGHI E NATURA

Biologia dei funghi

Esiste sulla Terra una famiglia di organismi antichissimi, il cui percorso evolutivo si distaccò da quello di altre specie circa 1,5 miliardi di anni fa e che colonizzarono la terra nel Cambriano, più di 500 milioni di anni fa (Taylor & Osborn, 1996), più probabilmente 635 milioni di anni fa, nel periodo Ediacariano.

Sono una branca della famiglia degli Eucarioti che comprende lieviti, muffe e miceti (in italiano comunemente chiamati funghi) e che costituisce un regno a sé stante. Spesso confusi con specie vegetali, i funghi sono in realtà molto più vicini al regno animale dal punto di vista genetico, in quanto come questi ultimi traggono nutrimento dall'ambiente che li circonda secernendo enzimi digestivi ed assorbendo le molecole nutritive dall'esterno; a differenza delle specie vegetali, essi non si nutrono quindi per mezzo di fotosintesi.



A differenza del regno animale però, essi si spostano nel loro habitat mediante la crescita, e solo una loro parte (le spore) si muove nell'aria o nell'acqua spinte dalla corrente; un'altra differenza sostanziale rispetto al regno animale, è che la digestione dei funghi avviene all'esterno, non presentando infatti un vero e proprio apparato digestivo.

Ciò che accomuna gli organismi appartenenti al regno dei funghi sono le seguenti tre caratteristiche:

- alimentazione eterotrofa: i funghi si nutrono di sostanze organiche elaborate da altri organismi;
- manca di tessuti differenziati e di elementi conduttori di linfa;
- sistema riproduttivo tramite spore, e non attraverso uno stadio embrionale come piante e animali.

Al regno dei funghi appartengono organismi eterotrofi riproducendosi da spore, da molto semplici (unicellulari) a più complessi (pluricellulari) con struttura vegetativa eventualmente organizzata in cellule formanti strutture filamentose dette ife o micelio primario, non differenziate in tessuti. A differenza delle cellule vegetali, che hanno una parete costituita prevalentemente da cellulosa, la parete cellulare dei funghi è costituita da differenti glucani (beta-glucani prevalentemente non cellulosici) e da un altro polisaccaride, la chitina, polimero dell'aminozucchero N-acetil-glucosamina, presente anche nell'esoscheletro degli artropodi. La chitina, rispetto alla cellulosa è molto più resistente alla degradazione microbica. In passato i polisaccaridi strutturali chitinosi venivano chiamati micosina.

Riguardo ai polisaccaridi di riserva, i funghi possono accumulare, analogamente agli animali, sostanze di riserva energetica sotto forma di glicogeno, diversamente dai vegetali che utilizzano l'amido.

Siamo spesso portati ad identificare i miceti con il loro corpo fruttifero, ovvero la struttura cellulare carnosa costituita solitamente da un gambo, da un cappello e dalle strutture che producono, proteggono e disperdono nell'ambiente le spore, le unità che assicurano la riproduzione (sessuata e non) del micete.

Questo evento manifesto, spesso repentino, è in realtà l'ultima fase di eventi cellulari che sono per la maggior parte invisibili agli occhi.

I miceti si riproducono mediante spore microscopiche, visibili come polvere all'occhio nudo; queste spore, nelle giuste condizioni di umidità, temperatura e nutrienti, germinano mediante filamenti cellulari chiamati ife. Espandendosi e diramandosi, ogni ifa instaura connessioni con altre ife generate da spore compatibili, creando così un tappeto di micelio che raccoglie nutrienti e umidità. Maturo, le cellule che compongono il micelio si aggregano sempre di più fino a formare i primordi che, se le condizioni sono favorevoli, si trasformeranno in corpi fruttiferi maturi, che disperderanno a loro volta nuove spore nell'ambiente.





L'eterotrofia dei funghi li costringe a un tipo di vita dipendente che si può differenziare in tre modalità, distinte in base ai rapporti del fungo stesso con il substrato di crescita: saprofitismo, parassitismo e mutualismo.

- Saprofiti

Si definiscono saprofiti tutti quei funghi che degradano sostanze non viventi di origine animale o vegetale in composti meno complessi. Ad esempio vari composti organici come la lignina e la cellulosa vengono aggredite e disgregate da una miriade di differenti funghi, che con i loro enzimi sono in grado di smontarli e nutrirsi in una catena metabolica molto intricata rendendo questi composti sempre più semplici fino a ottenere un residuo minerale assimilabile dal fungo.

Ogni fungo occupa una propria posizione in questa catena di demolitori altamente specializzati, tanto che se per una qualsiasi ragione un anello in questa successione venisse a mancare il processo metabolico si interromperebbe e l'insieme di organismi dipendenti dai precedenti morirebbe. In pratica non esiste composto organico che i funghi non riescano a degradare. Ad esempio, la specie *Hermodendron resinae* è capace di metabolizzare il cherosene. Si comprende il ruolo di estrema importanza che questi organismi hanno nel riciclare la materia organica di rifiuto.

- Parassiti

Si definiscono parassiti quei funghi che si nutrono di organismi viventi, portandoli a volte gradualmente alla morte. In natura essi operano la selezione dei più forti. Alcuni fra questi funghi, come ad esempio *Armillaria mellea*, dopo un iniziale comportamento da simbiote, diventano parassiti, per cui l'ospite (una pianta) viene ucciso, continuano poi con comportamento saprofita a nutrirsi dell'organismo ospitante anche quando questo è ormai morto; al contrario quelli definiti parassiti obbligati, per distinguerli dai precedenti che vengono detti facoltativi, muoiono se muore il loro ospite. I

Il parassitismo colpisce anche gli animali, l'uomo, gli insetti e gli stessi funghi, con specializzazioni ancora una volta anche estreme, ad esempio esistono funghi specializzati nel degradare solo le tegmine delle cavallette oppure di colpire una particolare specie di insetto. Ne esistono anche di predatori, capaci cioè di catturare, con trappole anche sofisticate (cappi strozzanti, bottoni adesivi), le loro prede. Di recente, si è tentato con discreto successo di utilizzare questi parassiti nella lotta biologica contro specie che sono risultate resistenti agli insetticidi. Ad esempio, le zanzare del genere *Anopheles* portatrici della malaria, vengono uccise dalla *Beauveria bassiana*; basta infatti spruzzare una emulsione di acqua, olio e micelio, dove l'olio serve a conservare l'umidità necessaria perché il fungo sopravviva.





- Simbionti

Si definiscono simbionti quelle forme di parassitismo controllato in cui una specie si avvantaggia dell'ospite e questi trae vantaggio dalla contaminazione col "parassita"; lo scambio è alla fine mutualistico. Ad esempio il fungo estrae zuccheri dalle radici della pianta ma per scambio chimico cede sali minerali, azoto, potassio, fosforo. Il processo di infezione viene detto micorriza. Il fungo cede anche acqua, nel costruire le proteine durante il processo di polimerizzazione tra il gruppo amminico di un amminoacido e il gruppo carbossilico di un secondo, di cui la pianta attraverso l'assorbimento radicale si impadronisce.

Si comprende come in caso di siccità questo meccanismo possa essere di grande aiuto. In un altro caso di simbiosi (Orchidee), il fungo cede zuccheri alla pianta in crescita, almeno fintanto che non si sviluppa il processo di fotosintesi. Poiché il seme della pianta è estremamente piccolo e non contiene praticamente carboidrati, la simbiosi è qui vitale.

I funghi possono anche formare simbiosi con delle alghe per formare i licheni. Questi organismi pionieri sono formati da un fungo (micobionte) e da un'alga verde (fotobionte) e talvolta cianobatteri (o alghe azzurre).

Il ruolo dei Funghi negli ecosistemi

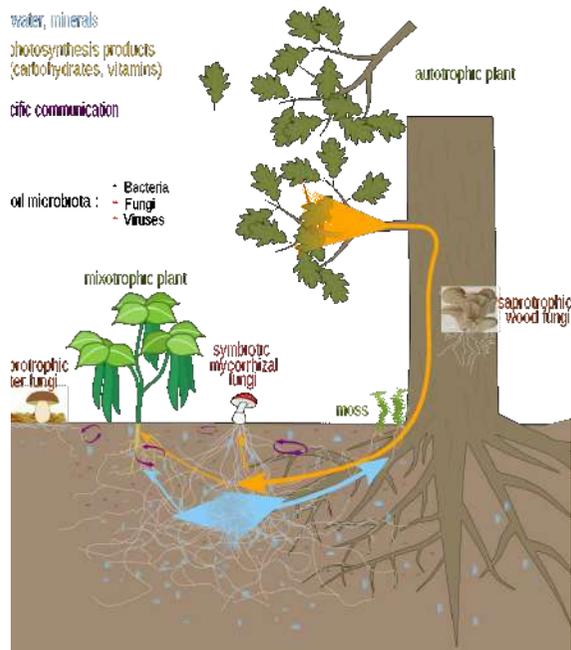
Nell'immensa complessità che caratterizza il nostro ecosistema, ogni elemento ricopre un ruolo fondamentale nel ciclo continuo di vita, trasformazione e morte; questo vale ovviamente per ogni specie, ed ora più che mai è risaputo quanto la perdita di un elemento di biodiversità possa compromettere l'equilibrio di un intero ecosistema.

Qualsiasi ecosistema dipende in maniera diretta dai funghi, senza cui l'equilibrio che rende possibile la vita sulla Terra collasserebbe. Nonostante la loro presenza sia a volte incospicua, i funghi sono presenti in ogni ecosistema della terra ed in essi ricoprono un ruolo fondamentale: insieme ai batteri infatti, i funghi sono i maggiori decompositori presenti sulle terre emerse e addirittura in alcuni ecosistemi acquatici. In ogni stagione, ad ogni latitudine, i funghi decompongono e riciclano materiale organico, filtrando microbi e detriti e rigenerando i suoli.

In quanto decompositori, reintroducono elementi fondamentali nei cicli nutritivi, soprattutto i funghi saprofiti e simbiotici, scomponendo la materia organica in molecole inorganiche, rendendole accessibili a cicli metabolici anabolici propri delle specie vegetali e di altri organismi.

Per questa loro capacità e per la loro estrema diversità, che li ha portati a specializzarsi e ad occupare la quasi totalità delle nicchie ecologiche, i funghi hanno stretto alleanze simbiotiche con la maggior parte dei regni tassonomici; queste interazioni possono essere mutualistiche o antagoniste, o in certi casi non recano danno né vantaggio all'organismo ospite, costituendo quindi un organismo "commensale".

Di particolare interesse sono i rapporti simbiotici con le specie vegetali, definite simbiosi micorriziche, di estrema importanza per la crescita e sopravvivenza delle piante negli ecosistemi. Più del 90% delle piante dipendono da rapporti micorrizici con specifici funghi, ed è grazie a questi loro alleati che possono raggiungere la maturità e riprodursi, soprattutto in ambienti ostili, dove il fungo non solo assicura nutrimento ma anche protezione da determinati patogeni.



La simbiosi micorrizica è antica e risale a circa 400 milioni di anni fa; spesso assicura alla pianta ospite l'assorbimento di nutrienti inorganici quali il nitrato ed il fosfato in suoli in cui questi composti indispensabili alla vita delle piante sono scarsi. Inoltre, i miceti simbiotici fungono a volte da mediatori tra pianta e pianta, trasportando nutrienti da un esemplare all'altro tramite il micelio, costituendo reti micorriziche (note anche come reti micorriziche comuni o CMN), reti di ife sotterranee create da funghi micorrizici che collegano tra loro singole piante trasferendo acqua, carbonio, azoto e altri nutrienti e minerali.

Questo particolare tipo di simbiosi ha fatto guadagnare ai funghi micorrizici la nomea di "Wood Wide Web", in analogia al "World Wide Web", per il ruolo di mezzo di comunicazione tra gli esemplari vegetali di un ecosistema dove, così come nel World Wide Web vengono scambiate informazioni, nel Wood Wide Web vengono scambiati nutrienti, acqua, segnali di pericolo, richieste di aiuto, in modo da costituire un unico Super-organismo che collabora all'unisono per la sopravvivenza di ogni sua parte.

Gli habitat sono pervasi da mosaici di micelio che si intrecciano, costituendo membrane che conducono informazioni tra le parti. L'attività del micelio dei funghi contribuisce a guarire e guidare gli ecosistemi lungo il loro percorso evolutivo, reintroducendo nutrienti nei cicli alimentari; come una matrice, una vera e propria autostrada biomolecolare, il micelio è in costante dialogo col suo ambiente, reagendo e governando il flusso di nutrienti essenziali che circolano nella catena alimentare.

Ovunque ci sia un accumulo di detriti, che siano essi costituiti da alberi caduti, perdite di petrolio o radiazioni nucleari, si costituisce una popolazione di funghi specializzati che rispondono con ondate di micelio. La capacità di adattamento dei funghi, dovuta alla loro immensa diversità genetica che comprende quasi due milioni di specie diverse, pongono le specie fungine in un rapporto di 6 ad 1 con le specie vegetali. Di queste specie, solo il 10% è stato identificato finora.

2- IL MICELIO COME MATERIALE

I Biomateriali

Negli ultimi decenni, grazie ai grandi progressi raggiunti nel campo della nanotecnologia e della chimica dei materiali, è stata possibile la produzione di materiali innovativi le cui caratteristiche e proprietà possono essere manipolate e progettate a livello atomico e molecolare. Nonostante le evidenti potenzialità, l'ingegneria dei materiali non è ancora riuscita a pareggiare la capacità di riproduzione e rigenerazione propria degli organismi biologici.

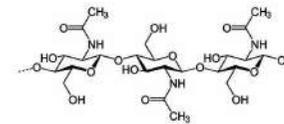
L'introduzione di sistemi viventi nella scienza dei materiali e nella nanotecnologia al fine di creare materiali di origine biologica sta diventando una sfida sempre più reale. Questo va di pari passo con la necessità sempre più cruciale di sviluppare materiali sostenibili che non costituiscano un elemento inquinante per l'ecosistema, senza contare l'evidente difficoltà di smaltire i rifiuti in plastiche derivanti dal petrolio. Attualmente, enormi sforzi di ricerca vengono compiuti per sviluppare tecniche vantaggiose per produrre materiali polimerici derivanti da risorse naturali quali la cellulosa, la lignina, la pectina di origine vegetale, proteine di origine vegetale e animale, poliesteri di origine batterica o vegetale, che assicurino sostenibilità, biocompatibilità, biodegradabilità oltre ad altre proprietà.

L'ostacolo principale nella produzione di questi materiali è costituito al momento dalla complessità dei metodi per processare, estrarre, sviluppare e rendere funzionali le materie prime, processo che può rivelarsi lungo, costoso o generare una resa bassa. Per questi motivi questi materiali, nonostante risolvano molti problemi ambientali, sono spesso costosi o trovano applicazioni limitate.

Chitin



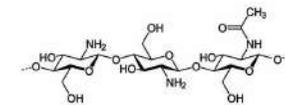
Formula: $C_{16}H_{28}N_2O_{11} \cdot (C_8H_{13}NO_5)_n$
Classification: Hexosamines, Biopolymer



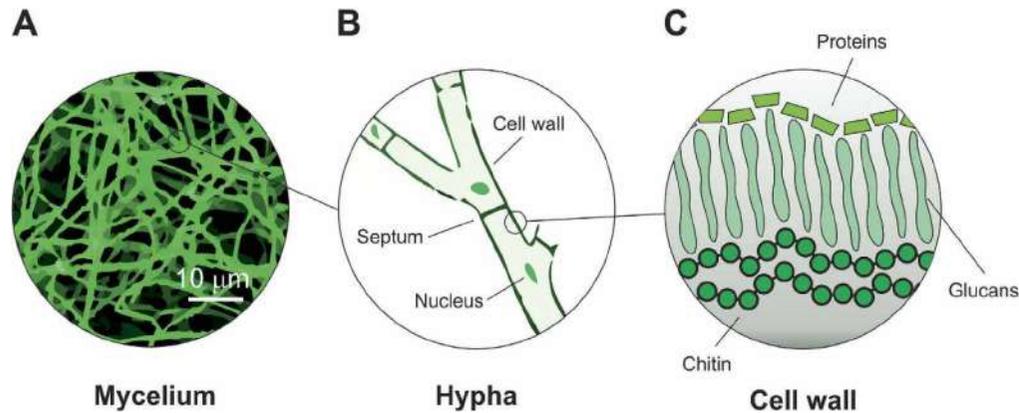
Chitosan



Deacetylated Chitin 85%
Classification: Linear Polysaccharide



Il micelio



In questo contesto il micelio dei funghi rappresenta un candidato vincente, costituendo per sua natura un materiale composito dove la porzione vegetativa del fungo (il micelio appunto) colonizza un substrato di origine vegetale, formando un reticolo intrecciato di fibre ramificate costituite da ife, ovvero cellule allungate.

Le cellule che costituiscono le ife sono separate da pareti cellulari interne chiamate setti, e sono racchiuse da pareti cellulari tubolari costituite da chitina all'interno, glucani (che variano da specie a specie) e proteine all'esterno.

La composizione della parete cellulare ha il ruolo di proteggere le ife da batteri o altri organismi, fornendo inoltre resistenza meccanica all'intera struttura del micelio. La crescita delle ife avviene mediante estensione della membrana cellulare all'apice. Le ife penetrano nel substrato di cui si nutrono tramite pressione e tramite secrezione enzimatica, in modo da scomporre i polimeri di origine biologica in sostanze nutritive di più facile assorbimento, quali gli zuccheri.



Il micelio è costituito principalmente da polimeri naturali quali la chitina, la cellulosa e varie proteine, che lo rendono a tutti gli effetti un materiale composito fibroso, la cui struttura e composizione può generare una grande varietà di biomateriali a seconda delle caratteristiche richieste.

2.1-CARATTERISTICHE DEL MATERIALE

La crescente domanda di materiali e processi produttivi sostenibili ha portato alla definizione di una nuova tipologia di materiali bio-compositi; questo termine si riferisce a materiali compositi, dove un bio-polimero viene accostato e rinforzato da fibre naturali (Dicker et al. 2014). Si deve però sottolineare che le fibre naturali sono anch'esse completamente o parzialmente costituite da bio-polimeri. Inoltre, con il termine "materiali di origine biologica", si definiscono materiali che contengono almeno un componente prodotto biologicamente e completamente biodegradabile, non escludendo quindi la presenza di altri componenti sintetici.

Uno dei maggiori vantaggi che i bio-compositi presentano è la possibilità di sfruttare scarti o residui biologici di natura vegetale, quali la lolla dei cereali, fibre di scarto e i fusti di certe specie vegetali. In questo modo i residui agricoli sono valorizzati invece di essere scartati, seguendo i principi dell'economia circolare.

I primi esperimenti nell'uso dei miceti come bio-materiali sono stati intrapresi negli anni novanta dallo scienziato giapponese Shigeru Yamanaka, nel tentativo di usare il micelio per la produzione della carta e di materiali da costruzione. Da allora, i materiali compositi derivanti dal micelio sono stati presi in considerazione per la commercializzazione, ed il loro potenziale è stato testato in diversi progetti concettuali.

In Europa, i primi esperimenti sul materiale sono stati condotti dall'italiano Maurizio Montalti in collaborazione con l'Università di Utrecht, testando i materiali compositi derivanti dal micelio accoppiati con i flussi di scarti dell'industria agricola europea.

I miceti sono organismi capaci di assicurare coesione a materiali incoerenti mediante la produzione di una massa di filamenti microscopici (ife) che formano il micelio. Nella letteratura finora prodotta, nei bio-compositi il micelio viene affiancato quasi esclusivamente a materiali non fossili derivanti da processi biologici, quali materiali vegetali, per permettere la crescita naturale del micete su questi substrati.

Data la loro natura di decompositori, i substrati lignocellulosici possono essere colonizzati da una enorme varietà di specie fungine, tra cui però spiccano quelle specializzate nella decomposizione del legno, appartenenti al phylum dei Basidiomiceti. Queste specie possono degradare efficientemente la cellulosa, l'emicellulosa e la lignina sia tramite processi enzimatici che non enzimatici, a seconda delle specie e delle condizioni di colonizzazione.

In questo modo la matrice del substrato viene penetrata dalle ife, che si sviluppano al suo interno in una rete sempre più fitta. Procedendo con la colonizzazione, il substrato viene man mano sostituito dalla biomassa del fungo, che compatta il substrato stesso dando vita al materiale bio-composito.

Questo bio-composito ha trovato applicazione nella produzione di materiali nell'ambito del packaging, dell'isolamento termico e acustico e nel design di complementi di arredo.

Schiume e Pacchetti Compositi

- Le schiume composte da micelio (MBF) sono materiali a bassa densità che si sviluppano dalla colonizzazione di un substrato lignocellulosico da parte del micelio. Il risultato è altamente anisotropo e fibroso, dove la biomassa del micete e il substrato residuo coesistono in un'unica matrice. Nella scienza dei materiali, per "schiuma solida" si intende solitamente il risultato di bolle di gas disperse all'interno di una matrice solida. I materiali compositi a base di micelio non rientrano esattamente in questa definizione ma, nonostante questo, sono solitamente collocati nella categoria data la loro porosità e lieve rigidità. Essenzialmente, gli MBF non hanno ancora subito il processo di pressatura (che può essere condotto sia a caldo che a freddo). Nonostante questo, i bio-materiali definiti "mattoni di micelio" o "pannelli" possono essere collocati in questa categoria, nonostante la pressatura modifichi in maniera consistente la densità del prodotto finito.

Le schiume a base di micelio (MBF) si presentano come una valida alternativa alle schiume tradizionali a base di polistirene e poliuretano. Nonostante la produzione sia condotta da poche compagnie a livello globale, il processo produttivo viene velocemente ottimizzato, fornendo un prodotto di alta qualità a prezzo contenuto.

- I pacchetti compositi sono costituiti da una struttura a sandwich dove gli strati esterni sono tenuti assieme dall'azione del micelio che colonizza il substrato contenuto nella parte centrale del pannello. A questa azione possono essere aggiunte colle che migliorino la coesione del materiale. Il materiale contenuto all'interno dei pacchetti è simile ad un MBF ed è collocato tra due strati di materiale lignocellulosico, che viene quindi colonizzato e fuso dal micelio stesso, costituendo un unico blocco.



Caratteristiche fisiche e meccaniche

DENSITA'

Questi materiali sono caratterizzati da una densità bassa, proprietà che non solo ne diminuisce considerabilmente il peso, ma ne condiziona anche altre caratteristiche fisiche, meccaniche e termiche. Il controllo della densità e della omogeneità del materiale costituiscono tuttora un aspetto problematico delle MBF, essendo strettamente collegate alla composizione ed alla struttura del substrato. Intuitivamente, maggiore è la densità di inoculo su granaglie nel substrato, maggiore sarà la densità, mentre maggiore è la frazione di fibre, lolle o polpa di legno, minore sarà la densità del prodotto finito. Inoltre, secondo uno studio condotto da Holt et al. (2012), la densità può essere ulteriormente diminuita nel caso sia usato inoculo liquido, e substrati di diametro inferiore ai 2 mm. In uno studio condotto da Islam et al. (2017) la densità di un materiale innovativo composto solo da micelio compresso è nel range di 0,03-0,05 g/cm³, valore simile a quello del Polistirene Espanso Sintetizzato (EPS) che va da 0,022 a 0,030 g/cm³. Questo significa che la biomassa vegetale che costituisce il substrato, una volta colonizzata dal micelio, diminuisce in densità a colonizzazione avvenuta. Oltre alla colonizzazione ed alla sostituzione della biomassa da parte del micelio, la pressatura (a freddo o a caldo) è decisiva nella densità finale dei MBF. I pannelli sono solitamente pressformati applicando una compressione di circa 30 kN, che ovviamente aumenta la densità del materiale rispetto al materiale non pressato.

CARATTERISTICHE TERMODINAMICHE

Le schiume sono solitamente utilizzate in edilizia per le loro proprietà termoisolanti, e nell'attuale letteratura queste proprietà, che riguardano anche le MBF, sono le più citate. Oltre alla bassa conducibilità termica, i materiali a base di micelio presentano anche un'alta capacità termica, che varia tra i 7,4 ed i 10,2 kJ/kg*k. Questo ha portato alla registrazione di un brevetto da parte di Amstivslavski et al. nel 2017 per una struttura a sandwich composta da numerosi strati costituiti da substrato colonizzato, la cui adesione reciproca è fornita dalla crescita del micelio. Come caratteristica generale, gli MBF hanno un ottimo potenziale come isolanti termici rispetto ad un'ampia varietà di materiali commerciali solitamente utilizzati in edilizia, nonostante la loro conducibilità termica sia maggiore.

CARATTERISTICHE ACUSTICHE

Oltre a presentare buone proprietà termiche, le MBF sono anche state oggetto di analisi dal punto di vista acustico. Nello studio condotto da Pelletier et al. (2013) sono stati condotti test su vari pannelli caratterizzati da substrati diversi, registrando un assorbimento acustico compreso tra il 70% ed il 75% ad una frequenza di 1000 Hz anche nei provini con la peggiore performance.

La comparazione con spettri acustici ha dimostrato che l'assorbimento acustico migliore è stato registrato su provini con substrato composto al 50% di *Panicum Virgatum* ed al 50% di saggina (*Sorghum Vulgare*). Dal momento che i test sono stati condotti sullo smorzamento delle frequenze stradali dominanti, i pannelli di questo tipo possono essere presi in considerazione per un isolamento termo-acustico applicato alle pareti di un edificio, siano questi posizionati all'interno della parete o come finitura superficiale, dal momento che la finitura corrugata aumenta l'assorbimento acustico.

RESISTENZA AL FUOCO

Test di laboratorio hanno dimostrato la capacità del micelio di resistere al fuoco, dove ad un iniziale periodo di ignizione a temperature superiori ai 100 °C il micelio non rilascia calore, dimostrando di essere in una fase di non-combustione. La perdita di massa in questa fase è indipendente dal consumo di ossigeno, e può quindi essere attribuita interamente alla perdita della massa d'acqua contenuta nel materiale. Nel range dei 100-200 °C lo scambio di calore aumenta, dovuto alla combustione di elementi infiammabili volatili dal basso peso molecolare. Il micelio comincia a degradarsi a 225 °C con un picco ai 300 °C. Le proprietà di reazione al fuoco dei materiali a base di micelio sono significativamente migliori rispetto a polimeri simili commercialmente reperibili quali PMMA e PLA, rendendolo un materiale meno infiammabile rispetto a questi ultimi e più sicuro dal punto di vista della resistenza al fuoco.

IGROSCOPIA E RESISTENZA ALL'ACQUA

A valori di umidità relativa pari al 50% i materiali a base di micelio presentano un assorbimento del 4% e indipendenti dal substrato e dalla specie fungina. A valori di umidità relativa superiori (85%) il valore di assorbimento aumenta lievemente al 6%. Il massimo valore di assorbimento (20%) si registra ad un'umidità relativa del 100%. Questi valori sono in accordo con la natura igrofoba del micelio, dovuta alla presenza di specifiche proteine (mannoproteine e idrofobina) presenti nella parete cellulare del micelio e alla conformazione ruvida a livello microscopico del materiale e della sua natura fibrosa.

RESISTENZA A COMPRESSIONE

La resistenza a compressione rappresenta una delle questioni principali che riguardano le MBF come materiale edilizio. Secondo la letteratura scientifica attualmente prodotta, la resistenza a compressione delle MBF è compresa tra i 2,9 N/cm² ed i 56,7 N/cm², dove il range più alto è stato registrato da Amstivslaski et al. (2017). Lopèz-Nava et al. (2016) affermano che la resistenza a compressione delle MBF è sempre minore di parecchie categorie standard di Polistirene Espanso Sintetico (EPS). Nonostante questo, Amstivslaski et al. (2017) hanno prodotto materiali i cui valori sono pienamente competitivi con quelli di parecchie categorie di EPS (II,IV,IX,X) inoculando su substrati più complessi, costituiti da segatura, grani di miglio, crusca di frumento ed altre fibre naturali, con inoculi di *Irpepex lacteus*, un micete che si è dimostrato capace di sviluppare un micelio estremamente più tenace di quello del *Pleurotus*, ma comunque meno tenace di quello delle varietà di *Ganoderma*.

La variabilità delle performance a compressione delle MBF è chiaramente dovuta alle differenze che possono intercorrere sia tra diversi substrati che tra le specie fungine che le colonizzano. È comunque risaputo tra chi sperimenta con questi materiali che le varietà di *Ganoderma* producono un micelio particolarmente tenace, mentre le varietà di *Pleurotus* sono solitamente meno rigide. Un altro fattore che modifica le performance delle MBF a compressione è l'assorbimento di acqua durante la colonizzazione, sia da parte del substrato che da parte del micelio.

RESISTENZA A TRAZIONE

La resistenza a trazione delle MBF non è stata fino ad ora indagata sufficientemente, nonostante i valori registrati si sono rivelati promettenti se comparati a quelli delle principali categorie di EPS. La peculiarità principale rispetto ad altri bio-materiali è costituita dalla presenza di due molecole che compongono la parete cellulare del micelio: la chitina e l'idrofobina. Nello studio condotto da Lopèz-Nava et al. (2016), le MBF prodotte con substrato in paglia di frumento colonizzato con specie di *Pleurotus* hanno dimostrato di possedere una resistenza a trazione maggiore di tutti i tipi di EPS. La resistenza a tensione ultima varia tra i 10 N/cm² ed i 30 N/cm². In particolare, secondo uno studio condotto da Haneef et al. (2017), nelle specie di *Pleurotus* è stata registrata una elongazione minore (4-9%) precedente alla rottura, rispetto a quella misurata nei provini di *Ganoderma Lucidum*, dove è stata registrata una elongazione pari al 14-33%, nelle cui cellule è presente una maggiore concentrazione di proteine e lipidi che in fase di sollecitazione si comportano come agenti plastificanti, rendendole vere e proprie proteine strutturali presenti nelle pareti cellulari. Secondo altri studi, l'eliminazione del gene che porta alla produzione di idrofobina su esemplari di *Schizophyllum Commune*, porterebbe ad un miglioramento delle prestazioni in provini sottoposti a trazione, dal momento che il micelio prodotto si presenta più denso. In questo caso, secondo Appels et al. (2018), il micelio si comporta in maniera simile alle termoplastiche.

IMPORTANZA DEL CONTENUTO D'ACQUA PER I COMPOSITI A BASE DI MICELIO

Dal momento che i compositi a base di micelio sono il risultato di un processo biologico, un'adeguata idratazione del substrato è necessaria per permettere al micete di proliferare e condurre le sue funzioni fisiologiche. Una volta che la colonizzazione è completa, la maggior parte del contenuto di acqua deve essere eliminato per devitalizzare l'organismo e per assicurare un prodotto finale funzionale. La letteratura finora prodotta non definisce una percentuale di umidità ottimale né per quanto riguarda le MBF né per le MBSC, considerato il fatto che questo valore dipende molto anche dalla composizione del substrato e dalle specie fungine coinvolte. L'umidità a fine colonizzazione si stima essere tra il 59% e l'80%, mentre quella considerata "accettabile" per il prodotto finito è tra il 10% ed il 15%. Certo è che la percentuale di umidità condiziona le prestazioni meccaniche dei materiali a base di micelio (Yang et al., 2017). Quindi vi è una forte correlazione tra le tecniche utilizzate nel processo di essiccazione e le proprietà del prodotto finito. Un trattamento prolungato ad alte temperature è associato ad un alto modulo elastico, alta resistenza flessionale ed a trazione.

Il micelio e l'economia circolare

La produzione di bio-compositi ha un basso impatto ambientale, e risulta in materiali biodegradabili ad un costo estremamente basso. Svariati studi hanno dimostrato la competitività di bio-compositi fungini a bassa densità, paragonandoli alle performance di materiali convenzionali quali polistirene espanso (EPS) o altre schiume, o ad altri materiali bio-compositi quali i cementi a base di canapa.

In questo senso, i materiali composti da micelio si pongono in competizione con altri materiali considerati "eco-friendly", come le bioplastiche e il legno composito, in quanto completamente naturali e compostabili, rientrando nel concetto di economia circolare, dove i materiali e le risorse vengono mantenute all'interno dell'economia il più a lungo possibile e la produzione di rifiuti è minimizzata (Eu action plan: COM/2015/0614).

I bio-compositi fungini hanno un'ampia potenzialità di caratteristiche tecniche ed estetiche raggiungibili mediante variazioni minime dei parametri nel processo di produzione, come il tipo di substrato utilizzato, le specie fungine coinvolte, le condizioni di umidità e temperatura in fase di colonizzazione, o i processi di raffinamento successivi la colonizzazione.

I metodi per la produzione di bio-compositi fungini sono vari, ma prevedono la colonizzazione del substrato che viene preventivamente o successivamente collocato in casseforme; a colonizzazione avvenuta, il materiale viene pressato e sottoposto a trattamento termico. Un'ulteriore classificazione non è possibile, dal momento che attualmente sono state sviluppate principalmente due tipologie di materiali: le schiume e i pacchetti composti.

Valutazione del ciclo di vita dei materiali a base di micelio

La tecnologia basata sul micelio fa affidamento su processi biologici estremamente simili a quelli che avvengono in natura, dove gli organismi fungini proliferano su substrati lignocellulosici. Attualmente, vengono utilizzate macro-specie medicinali o edibili per le loro caratteristiche morfologiche e per la loro coltivabilità, inoltre perché non sono legate alla produzione di mico-tossine o metaboliti volatili o solubili. Dal momento che queste specie proliferano su substrati lignocellulosici, è possibile utilizzare una pletera di prodotti secondari della produzione e dell'industria agricola, così come residui di tessuti di origine naturale. Fusti di scarto, o parti di fusti, segatura, lolle, gusci, sono tutti substrati utilizzabili, a seconda delle caratteristiche delle specie fungine e della disponibilità di questi prodotti. In generale, questi materiali verrebbero salvati e valorizzati se utilizzati per questo scopo. Una volta che il substrato è stato inoculato, la colonizzazione procede in maniera autonoma degradando progressivamente il substrato fino alle ultime fasi (essiccazione, pressatura e finitura se prevista).

La tecnologia basata sul micelio rappresenta un modello che soddisfa tutte le necessità di un'economia circolare, secondo le seguenti affermazioni:

1. I materiali di scarto sono reintrodotti in un processo produttivo invece di essere eliminati, il prodotto finale è quindi combustibile o compostabile;
2. I materiali e le fonti di energia utilizzate nella produzione dei prodotti sono pulite, il prodotto finito ha caratteristiche significativamente migliori rispetto ai prodotti non biodegradabili;
3. Un ciclo di vita basato sul micelio assicura un'ottimizzazione delle risorse e del consumo di energia rispetto a prodotti tradizionali.

La produzione di questi materiali può avere posto all'interno di un'economia circolare solo se l'intero processo produttivo viene accordato a queste tre affermazioni, e se ne deve quindi valutare ogni step in sede di progettazione. In questo campo, la società Ecovative Design rappresenta un esempio di successo in questo campo, dove la progettazione è una funzione della valutazione del ciclo di vita, il cui principale obiettivo è l'autocorrezione e l'autoformazione nella progettazione, nei processi produttivi e nel management attraverso feedback positivi. Prendendo ad esempio Ecovative Design, sono tre i momenti che condizionano questa valutazione:

- Produzione dell'inoculo;
- Scelta dei materiali (valutando quali assicurerebbero la giusta ratio tra resistenza e peso e i costi di trasporto);
- Processo di essiccazione e pressurizzazione che costituisce il 56% dell'impronta di carbonio nell'intera produzione.

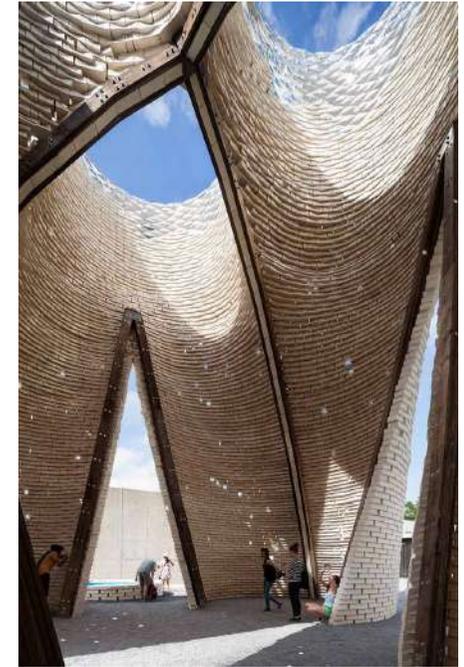
Contraintuitivamente, il processo di pastorizzazione del substrato e di mixaggio ha un impatto estremamente basso. La biodegradabilità dei compositi a base di micelio ha un ruolo chiave nella valutazione del ciclo di vita del materiale; essi sono completamente biodegradabili ammesso che non vengano trattati con colle, vernici o sostanze impregnanti. In fase di produzione, va tenuto conto inoltre di eventuali contaminazioni da parte di altri organismi competitori, in particolare delle specie di funghi micoparassitici appartenenti alla famiglia dei Trichoderma, dato il loro sistema chitinolitico.

2.2- STATO DELL'ARTE

Hy-Fy - The Living

Realizzato nel 2014 nel Queens a New York, su commissione del Museum of Modern Art e del MoMA PS1, è una torre circolare in mattoni organici in micelio, costituiti da un substrato in steli di mais. La fase di colonizzazione dura circa 5 giorni per ogni mattone, senza che questo riceva alcun tipo di energia, ed il risultato è un elemento costruttivo leggero, a basso costo ed estremamente sostenibile. Una volta smontato il padiglione, i mattoni vengono compostati ed il compost utilizzato dagli orti comunitari della zona.

La struttura non offre quindi soltanto ombra, luce e sorci sulla città, ma costituisce anche un'esperienza orientata al futuro, che possa suggerire un nuovo modo di pensare all'architettura, dal momento che tutti i materiali, la produzione, la costruzione, lo smontaggio, il compostaggio e la successiva coltivazione avvengono nel raggio di 200 Km dal sito di costruzione.



The Growing Pavilion - Company New Heroes & Dutch Design Foundation

In occasione della Dutch Design Week 2019 di Eindhoven il team Biobased Creation di Company New Heroes e la Dutch Design Foundation hanno realizzato questo padiglione in legno, canapa, micelio, stiancia e cotone.

Nel tentativo di ispirare i progettisti, i produttori di materiali edilizi, e tutti i fruitori (oltre 75.000 nei dieci giorni di questo evento) ad immaginare nuovi modi di approcciarsi ai biomateriali, i progettisti hanno realizzato un padiglione interamente costituito da biomateriali. La facciata è composta da 88 pannelli in micelio per una superficie di circa 125 m². Il movimento dato ai pannelli in facciata vuole mimare quello che è il processo di produzione, indirizzando l'attenzione sul fatto che il materiale di cui è costituito è un materiale che cresce.



The Shell Mycelium Pavilion - BEETLES 3.3 & Yassin Areddia Design

Realizzato al MAP Project Space della Dutch Warehouse, nel contesto della Kochi Muziris Biennale 2016 Collateral in India, rappresenta una declinazione del design consapevole attraverso le strutture temporanee.

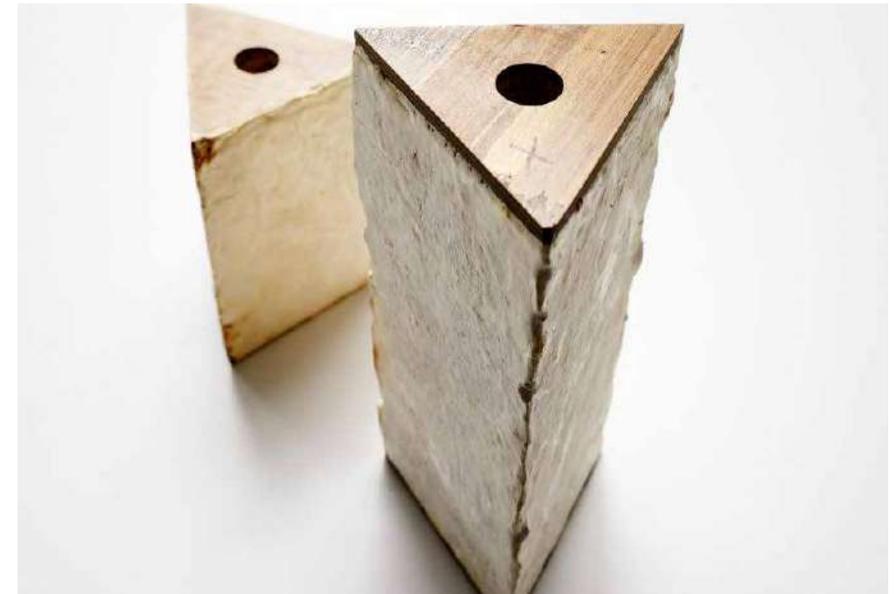
Nell'era della concrete jungle e delle città affollate la temporaneità, la sostenibilità e l'affidabilità diventano parte delle responsabilità dell'architettura. Questo è un campo nuovo nella biologia e nell'architettura, che si rivolge alla necessità di temporaneità, nel tentativo di replicare la natura per spianare la strada verso il futuro, dove l'esistenza mette in discussione la permanenza.

Il padiglione non solo si inserisce nel contesto in maniera organica, ma è stato concepito tenendo in considerazione le risorse locali, sia dal punto di vista dei materiali che delle manovalanze. Il micelio è stato fornito da una azienda di produzione locale. La struttura in legno è stata concepita per posizionarsi all'interno della Dutch Warehouse, un edificio diroccato e, una volta eretta, è stata ricoperta in fibra di cocco inoculata dal micelio. Dopo qualche giorno, il micelio ha ricoperto la struttura, che si sarebbe poi degradata seguendo il suo naturale ciclo vitale.



Myco Tree - Dirk Hebel & Philippe Block

Nel tentativo di usare il micelio dei funghi per fini strutturali, i due progettisti hanno progettato e realizzato questa struttura sperimentale, in occasione della Biennale di Architettura e Urbanistica di Seoul, affermando inoltre che il micelio, se opportunamente modellato, potrebbe costituire la struttura di un edificio a due piani. L'installazione è costituita da diverse dozzine di elementi costituiti da micelio, pannelli di bambù e tasselli in acciaio, dove è il micelio a supportare tutti i carichi, lavorando a sola compressione. I blocchi sono composti dal micelio e da un substrato di segatura e canna da zucchero. Dopo qualche giorno di colonizzazione, il substrato inoculato viene trasferito in casseforme, dove porta a termine la colonizzazione creando dei blocchi solidi.



2.3- ESPERIMENTI CON IL MICELIO

Progettazione degli esperimenti

La scelta di considerare l'uso dei materiali a base di micelio nell'ambito dell'architettura è stata operata in base alla passione che ho sempre nutrito verso la biologia; questa mia passione si è intrecciata con il percorso di studi in Architettura, portandomi ad interessarmi alle specie vegetali e poco tempo dopo al mondo dei funghi.

L'interesse verso i funghi si è catalizzato verso la loro coltivazione, decisamente più ostica rispetto a quella delle piante. Avendo dimestichezza con le tecniche di coltivazione dei funghi, ho ritenuto doveroso condurre una ricerca sulla crescita di materiali a base di micelio al fine di dare una base sperimentale alla mia tesi.

La documentazione e le informazioni reperibili sul web non sono purtroppo sufficienti alla definizione di una tecnica univoca per la produzione del materiale; essendo ancora in una fase di sperimentazione, spesso le informazioni non vengono trasmesse o vengono condivise in maniera parziale. Ciononostante, prima di intraprendere la fase pratica, ho ritenuto necessario documentarmi consultando articoli accademici e confrontandomi con chi avesse esperienze sulla produzione di questo materiale.

La tecnica per la crescita di un materiale a base di micelio è molto simile a quella della coltivazione dei funghi. La produzione del materiale differisce dalla coltivazione perché, mentre in quest'ultima si cerca di aumentare la quantità di nutrienti presenti nel substrato, nella prima un minor apporto di nutrienti previene eventuali contaminazioni da parte di organismi competitori.

È proprio questo l'aspetto più delicato della produzione di materiale; in natura il micelio compete con gli altri organismi presenti nell'ecosistema, dove si applica il principio di sopraffazione del più forte sul più debole. Nella produzione in ambiente controllato è fondamentale assicurarsi che il substrato non contenga organismi competitori. Mentre in coltivazione si ricorre spesso alla sterilizzazione del substrato tramite autoclave, per la produzione del bio-materiale a base di micelio è sufficiente la pastorizzazione.

Il substrato può essere pastorizzato in tre modi

- In acqua calda, mantenendo la temperatura del substrato sopra gli 80 °C per 8-12 ore;
- In acqua fredda, con aggiunta di calce idrata per avere un substrato pastorizzato a freddo.
- In acqua fredda, con aggiunta di cenere e calce idrata.

Una volta pastorizzato il substrato scelto, è importante che venga lasciato raffreddare fino ad aver raggiunto una temperatura inferiore ai 37 °C., dopodiché il substrato può essere inoculato con una determinata proporzione di micelio su granaglie. Questa operazione può essere eseguita sia direttamente sul pannello che in blocco sull'intero substrato, che verrà poi posizionato sui pannelli.

Una volta posizionato il substrato, è necessario fornire le condizioni ottimali alla colonizzazione, quindi assenza di luce, umidità alta e temperature congrue alle specie selezionate. Queste condizioni possono essere raggiunte posizionando i pannelli su un telo protettivo in polipropilene e coprendolo con lo stesso materiale.

Dopo circa 10 giorni i pannelli vengono scoperti e lasciati a consolidare in ambiente umido e con alta concentrazione di CO₂, che inibisce la fruttificazione, in questo modo il micelio ricoprirà completamente il substrato ed il pannello creando una finitura omogenea.

Al termine della colonizzazione, i pannelli possono essere seccati in condizioni di penombra o al sole diretto, a seconda delle condizioni atmosferiche.

La ricerca sperimentale è stata suddivisa in due fasi:

- Selezione della specie fungina. In questa fase sono stati prodotti provini per ognuna delle specie fungine precedentemente indicate. I criteri di valutazione dei provini sono la velocità di colonizzazione, l'assenza di contaminazioni e la rigidità del materiale finale.
- Selezione del substrato ottimale. In questa fase la specie fungina selezionata viene testata su tre materiali diversi: pellet di faggio, paglia di frumento e paglia di canapa. I criteri di valutazione dei provini sono la velocità di colonizzazione, l'assenza di contaminazioni e la rigidità del materiale finale. La scelta del substrato in fase di realizzazione del pannello deve anche tenere conto dell'effettiva reperibilità del materiale nelle quantità necessarie alla realizzazione del manufatto, mantenendo saldi i principi di sostenibilità della materia prima, avendo cioè l'accortezza di selezionare un materiale che sia prodotto il più possibile vicino al sito di realizzazione.

La situazione causata dalla pandemia ha reso particolarmente complessa la conduzione di questi esperimenti, se in una prima fase era intenzione svolgere l'attività di tirocinio presso il Laboratorio Ufficiale di Prove Materiali e Strutture dell'Università degli Studi di Firenze, la chiusura delle strutture dell'Ateneo e l'impossibilità di accedere agli spazi di laboratorio hanno eliminato questa possibilità, compromettendo in parte la fase sperimentale. Nonostante le criticità che la pandemia ha causato, in particolare nel reperimento dei materiali, nella mancanza di spazi adeguati dove svolgere gli esperimenti e soprattutto per quanto riguarda le prove sui materiali, i risultati sono soddisfacenti e dimostrano quanto le tecniche di crescita del materiale siano versatili e ripetibili addirittura in ambiente domestico.

In una fase successiva, in vista della ricerca di finanziamenti per lo sviluppo del progetto, verranno condotti i test sui provini prodotti al fine di determinarne le caratteristiche fisiche e meccaniche, per avere un riscontro pragmatico e poterne quindi definire l'effettiva performance in quanto materiale da costruzione.

Le valutazioni dei provini sono quindi relative ai tempi di colonizzazione, alla bassa tendenza alle contaminazioni, alla capacità del micelio di aderire al materiale di supporto scelto ed alla qualità della finitura dopo l'essiccazione. Ulteriori valutazioni si basano sulla documentazione scientifica studiata ed illustrata nel precedente capitolo.

Selezione della specie fungina

In questa prima fase sono stati prodotti provini su cui inoculare tre diverse specie fungine. Il substrato è stato pastorizzato mantenendo una temperatura superiore agli 80 °C per circa 12 ore. In fase di realizzazione questa operazione di pastorizzazione è l'operazione che produce maggiori emissioni, si ipotizza che date le quantità che dovranno essere pastorizzate si ricorrerà ad una pastorizzazione a freddo, lasciando a mollo il substrato in acqua alcalina (acqua e calce idrata).

Una volta pastorizzato il substrato, sono state prodotte 3 cornici, necessarie a testare l'effettiva capacità del micelio di attaccare le pareti cellulari del legno. Le tre cornici sono state riempite per l'80% di substrato e per il restante 20% di inoculo specifico delle tre specie fungine, e quindi riposte in buste dotate di filtro traspirante.

Nell'arco di tre settimane la colonizzazione è completa ed i provini sono stati essiccati in forno a 100 °C circa.

I risultati sono i seguenti per le tre specie fungine:

•Pleurotus Ostreatus (ceppi 101 e 102), nonostante il micelio colonizzi in maniera aggressiva, il materiale che ne risulta presenta scarsa resistenza a compressione, questo può essere dovuto all'uso della paglia come substrato. Per l'applicazione in questa tesi, dove il micelio non necessita di rispondere a sollecitazioni costituendo la sovrastruttura del pannello, potrebbe essere selezionato il Pleurotus. Nonostante ciò il materiale prodotto ha anche subito un processo di restringimento consistente in fase di essiccazione; questo può essere dovuto a due fattori: l'uso della paglia come substrato o l'essiccazione troppo repentina. Nel caso venga selezionato uno di questi ceppi per condurre la seconda fase sperimentale, si testeranno vari materiali come substrato per determinare quale sia il migliore per la realizzazione del pannello, e si svilupperanno tecniche più specifiche per l'essiccazione del materiale.

•Lentinula Edodes, questa specie fungina colonizza molto lentamente rispetto alle altre selezionate, questo ha portato ad una contaminazione del substrato da parte di organismi competitori che hanno reso il provino inutilizzabile ai fini di questa ricerca. L'agente contaminante individuato è il Trichoderma, principale competitore nella coltivazione dei funghi. Nonostante si hanno evidenze dell'uso di questo fungo per la produzione di materiali a base di micelio, è stato scartato a favore di specie più aggressive.

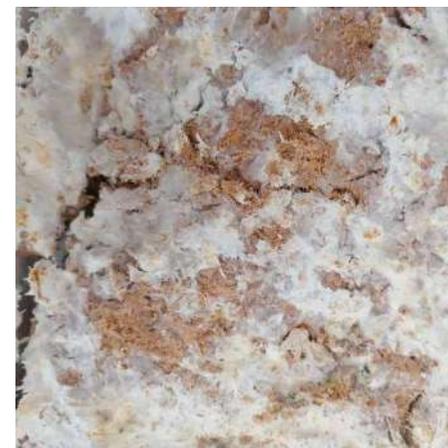
•Ganoderma Lucidum, questa specie fungina ha mostrato la colonizzazione più aggressiva rispetto alle altre sperimentate. La prima fase di colonizzazione è durata circa dieci giorni, senza contaminazioni apparenti. Inoltre, ha mostrato la migliore propensione ad attaccare il legno del provino, fondendosi effettivamente alla cornice. In ultima istanza, il materiale prodotto risulta estremamente più rigido degli altri test, non compromesso dalla fase di essiccazione ad alte temperature. Ai fini di questa ricerca, per la sua aggressività in fase di colonizzazione, l'assenza di contaminanti e la rigidità del materiale, riscontrata oltretutto nella documentazione scientifica consultata, è stata selezionata questa specie fungina per la seconda fase di sperimentazione.



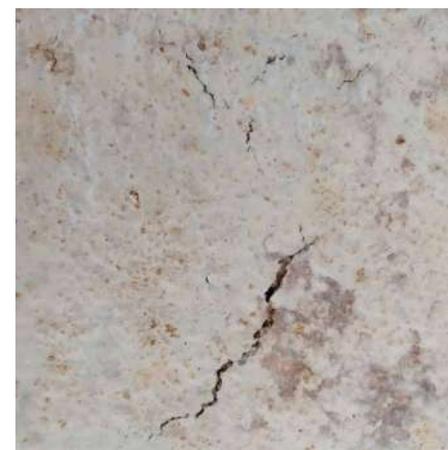
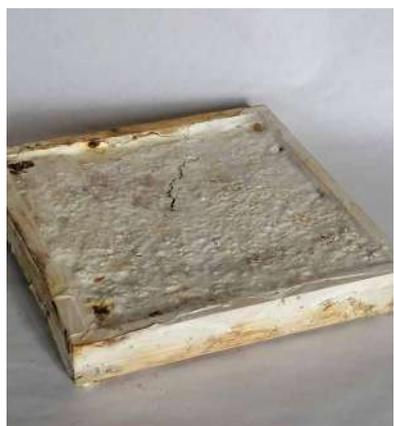
Esemplare di *Pleurotus Ostreatus*



Esemplare di *Lentinula Edodes*



Esemplare di *Ganoderma Lucidum*



Selezione del substrato

La seconda fase di sperimentazione prevede la produzione di tre provini differenti relativi a tre substrati selezionati. Questi sono:

- paglia di frumento;
- paglia di canapa;
- segatura di faggio.

Bisogna specificare che questi tre substrati, scarti della lavorazione di specie vegetali, rappresentano una minima parte dei possibili substrati adatti alla crescita dei materiali a base di micelio. Il micelio può infatti essere coltivato su una pletera di substrati che possono comprendere:

- lolla di cereali;
- scarti della lavorazione della canapa;
- scarti di cartone;
- segatura di legni duri;

La valutazione della seconda fase di sperimentazione si basa quindi sulla capacità del micelio di crescere su materiali con diverso apporto di nutrienti.

La volontà di sviluppare una tecnologia capace di realizzare ampie coperture costituite da materiali sostenibili e compostabili mette quindi di fronte all'impossibilità di selezionare un substrato univoco; la valutazione finale dipenderà dalla possibilità di reperire un materiale ottimale che costituisca uno "scarto" prodotto in prossimità del sito di intervento.

Questo ricade nella volontà di inserire questo processo progettuale all'interno di un'ottica di Economia Circolare, che dipende quindi da una serie di relazioni instaurate sul territorio che ricercano nuovi modi per ridurre gli sprechi e riutilizzare i sottoprodotti di una determinata produzione come materie prime necessarie ad una seconda filiera produttiva.

Nell'ottica di realizzare un manufatto sfruttando la tecnologia sviluppata in questa tesi, ho intrapreso con le associazioni di cui faccio parte (No Dump, ICVCV) una ricerca di relazioni che permettano il reperimento del materiale al minimo costo, con i minori costi di trasporto e quindi con il minore impatto ambientale possibile.



Pellet di segatura di Faggio



Pellet di paglia di Frumento

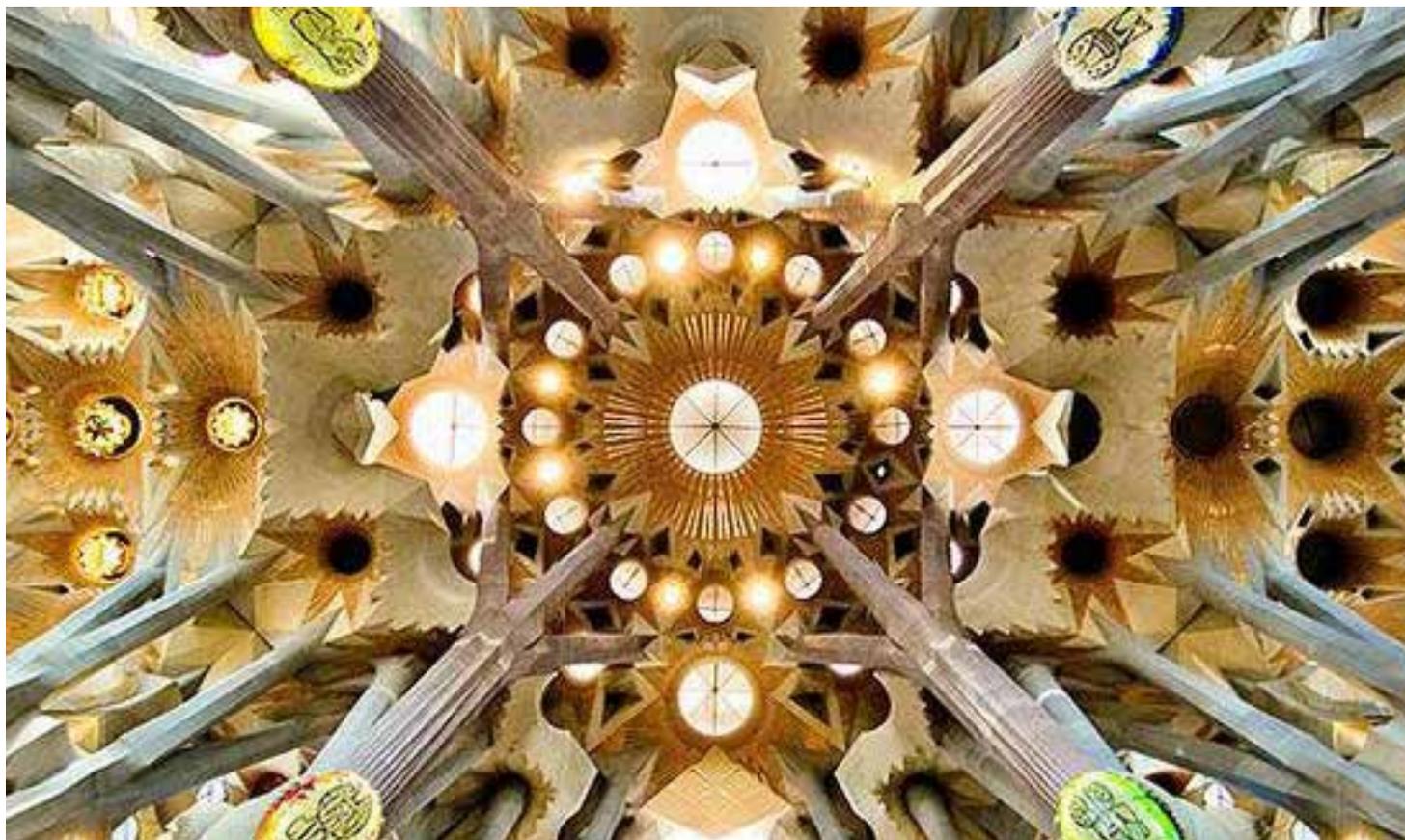


Paglia di Canapa



4- CONCEPT

“Spariranno gli angoli e la materia si manifesterà abbondante nelle sue rotondità astrali; il sole vi penetrerà per i quattro lati e sarà come un’immagine del paradiso. Si potrà trar partito dai contrasti e così il mio palazzo sarà più luminoso della luce.” [Antoni Gaudì]



“Volete sapere dove ho trovato la mia ispirazione? In un albero; l’albero sostiene i grossi rami, questi i rami più piccoli e i rametti sostengono le foglie. E ogni singola parte cresce armoniosa, magnifica.” [Antoni Gaudì]

Il Padiglione

In questa tesi i principi che hanno guidato la fase progettuale sono quelli dell'autocostruzione, della sostenibilità inserita in contesti di Economia Circolare e del Tactical Urbanism. Il rapporto tra il progetto Lumen ed il progetto del Parco del Mensola rappresenta lo scenario scelto ai fini della definizione di una serie di manufatti che rispondono a determinate necessità funzionali all'interno di questi due spazi.

L'idea iniziale era di prevedere un padiglione da inserire nelle strutture di allestimento del Festival Copula Mundi 2020, che costituisse uno spazio versatile dove prevedere eventi musicali, sportivi, installazioni e performance artistiche e workshop, seguendo lo spirito del festival che si propone come un evento culturale trasversale che abbracci tutte le arti. La situazione pandemica causata dal virus COVID-19 ha visto l'annullamento di tutti gli eventi di questo genere.

La volontà di realizzare questo padiglione si è quindi ricalibrata secondo l'attuale stato delle cose, estraendolo dal contesto del Festival ma mantenendone i presupposti, rielaborando l'idea per renderla applicabile al Parco del Mensola come caso studio, nell'ottica di sviluppare una tecnologia applicabile a diversi contesti ed a diverse scale.

Il progetto per come è stato concepito non è un manufatto univoco, rappresenta piuttosto una declinazione di un processo applicabile in diversi contesti e seguendo determinati principi. Per definire una tect-nologia di questo tipo, fluida e versatile, è stato comunque necessario definire da subito una struttura di studio caratterizzata da una data configurazione di nodi in modo da poter sviluppare una strategia di modellazione sia per quanto riguardasse i pannelli che i nodi. È stata quindi progettata una shell structure attraverso procedure di form-finding mediante l'uso del plug-in di simulazione fisica Kangaroo, collegato a Grasshopper.

La scelta di definire una struttura a padiglione non è casuale: negli anni di esperienze nell'allestimento di eventi e festival temporanei, il tema della copertura è sempre stato centrale per la progettazione; il padiglione rappresenta il fulcro di questo tipo di eventi, e non solo risponde a necessità di tipo pratico quale il riparo dagli agenti atmosferici e la creazione di uno spazio ampio capace di ospitare un numero consistente di persone, ma spesso il padiglione principale rappresenta simbolicamente lo spirito dell'intero evento.

La struttura progettata in questa tesi vuole essere un manifesto per un nuovo modo di fare architettura, che adottando un approccio antidisciplinare trae da ogni disciplina gli input necessari all'implementazione di manufatti funzionali, sostenibili, dall'alto valore estetico e realizzabili a qualsiasi scala.

Un padiglione di questo tipo, realizzato secondo questi presupposti, costituirebbe la dimostrazione che è possibile modificare lo spazio che ci circonda migliorando la vita di chi ne fruisce, avendo un impatto ambientale minimo ed arricchendo non solo le comunità, ma anche gli ecosistemi.

Shell Structures

Nell'ottica di realizzare ampie coperture autoportanti, leggere ed assemblabili in situ senza obblighi di trasporto che ne aumenterebbero i costi, la scelta progettuale a monte è ricaduta sulla tipologia della Shell Structure, per la capacità che questo tipo di struttura ha di coprire ampie luci nonostante l'apporto minimo di materiale.

Le Shell Structures sono sistemi costruttivi descrivibili da superfici curve tridimensionali, in cui una dimensione è significativamente minore rispetto alle altre due. Sono strutture passive che rispondono ai carichi esterni prevalentemente tramite tensioni di membrana. Per "struttura passiva" si intende un sistema strutturale che non modifica in maniera significativa la sua morfologia al variare delle condizioni di carico, a differenza delle "strutture attive" quali le tensostrutture. Una Shell Structure trasferisce i carichi esterni sugli appoggi principalmente tramite tensioni di membrana, che possono essere di compressione o di trazione, o una combinazione di entrambe.

Questa tipologia di struttura può essere realizzata sia come una superficie continua (calcestruzzo armato, muratura) che con elementi discreti che ne seguono la morfologia (profili in legno o acciaio, cavi di acciaio), in quest'ultimo caso si parla di grid-shells.

Si possono distinguere tre tipologie principali di geometrie per le Shell Structures:

- Freeform, ovvero shells a curvatura libera o scultoree generate senza prendere in considerazione la performance strutturale. Se generate digitalmente, sono solitamente descrivibili da polinomi di grado superiore;
- Matematiche, geometriche o shells analitiche sono descritte direttamente da funzioni matematiche. Queste funzioni sono scelte solitamente per comodità nelle analisi successive e per la possibilità di descriverne la morfologia nelle fasi di fabbricazione. Queste sono descritte solitamente da polinomi di grado inferiore (iperboloidi, ellissoidi e paraboloidi iperbolici o ellittici), o funzioni trigonometriche e iperboliche (catenarie);
- Form-Found, includono strutture naturali appese, simili alle strutture funicolari di Antoni Gaudì, Frei Otto e Heinz Isler, ma anche strutture tese sollecitate a momenti flettenti. Se la morfologia è definita digitalmente, viene inizialmente parametrizzata tramite funzioni a tratti o polinomi di grado superiore. La loro morfologia finale è il risultato del raggiungimento di uno stato di equilibrio statico.

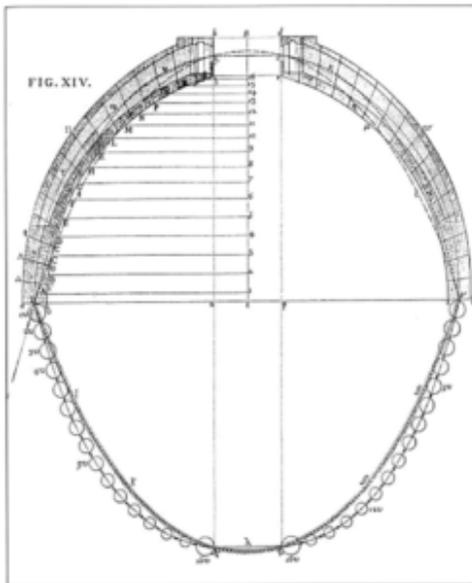
Ai fini di questa tesi, le cui tematiche spaziano anche per la modellazione digitale tramite algoritmi, si è scelta l'ultima di queste tipologie. Tramite la modellazione parametrica è possibile definire geometrie complesse che replicano le tecniche di form-finding tradizionalmente realizzate mediante modelli fisici in scala.



Form-Finding



Ritratto di Robert Hooke, Rita Greer (2009)



Verifica di stabilità della cupola di San Pietro, Poleni (1748)

In Architettura ed in ingegneria strutturale, con il termine "form-finding" si definisce il processo progettuale che ricerca strutture con configurazioni ottimali usando strumenti e strategie sperimentali, per simulare specifici comportamenti meccanici.

Il metodo della catenaria ribaltata è probabilmente la più antica e diffusa tecnica di form-finding per archi, volte e membrane. Modelli fisici costruiti con cavi elastici o membrane senza rigidità alla rotazione sono soggetti alla forza di gravità per ottenere uno stato strutturale di pura trazione; questa configurazione, chiamata "funicolare", se invertita produrrà una forma che identifica la configurazione sollecitata a sola compressione.

Questo principio fu per la prima volta codificato dallo scienziato e ingegnere inglese Robert Hooke (1635-1703) nel 1675 in cui, attraverso un anagramma risolto solo nel 1701, descriveva il seguente principio:

"Ut pendet continuum flexile, sic stabit rigidum inversum."

"Come una linea flessibile pende, così ma invertito un arco rigido sta in piedi"

Egli propose di ribaltare la curva generata da una catena sottoposta al proprio peso e vincolata solo alle estremità per ottenere la forma ottimale per un arco. Questa curva è chiamata "catenaria" quando la curva presenta una distribuzione dei carichi costante. Inizialmente confusa con una parabola da Galileo Galilei, fu poi descritta matematicamente da David Gregory nel 1697.

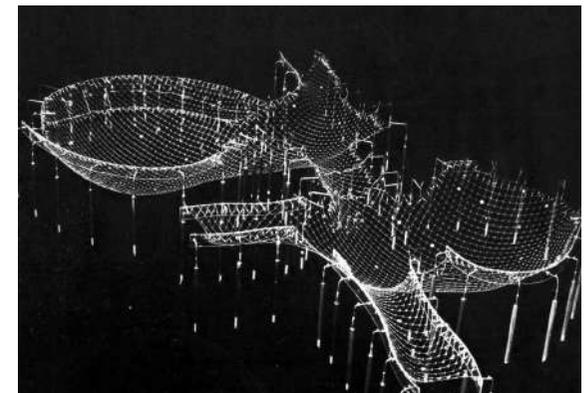
Lo stesso principio può essere esteso alle tre dimensioni per definire una configurazione strutturale per volte o membrane in calcestruzzo armato o in muratura, così come per gusci reticolari in acciaio o legno.

Si possono definire tre metodi di costruzione di questi modelli:

- Il primo prevede l'uso di cordini per discretizzare volte a botte (se paralleli) o cupole (se radiali), su cui vengono posizionati sacchetti di sabbia a rappresentazione dei carichi. Questa tecnica è stata utilizzata da Antoni Gaudì. Il modello più famoso è quello che realizzò per la chiesa di Colonia Güell, dove usò due ordini gerarchici di cordini: il primo definiva la geometria delle colonne e degli archi principali e supportava il secondo, che definiva la forma delle pareti e delle volte. Questo modello è stato ricostruito nel 1982 dall'Istituto di Strutture Leggere di Stoccarda, dimostrando quanto questo processo sia lungo e quanto dipenda dalla precisione di realizzazione per avere risultati accurati.



- Il secondo metodo prevede l'uso di reti non rigide costituite da catene per la definizione di gusci reticolari. La Multihalle a Mannheim (1973-1974) è la più grande struttura progettata seguendo questo metodo. Un primo modello in scala 1:300 in rete metallica fu realizzato da Frei Otto e dal suo gruppo di ricerca per stabilire la geometria principale, costituita da due aule principali connesse da un tunnel, dove la luce massima è di circa 60 metri. Un modello successivo in scala 1:98,9 fu realizzato per perfezionare la forma del guscio reticolare e per determinare la posizione esatta dei supporti. Il modello fu poi analizzato tramite fotogrammetria, in modo da raccogliere dati geometrici che potessero essere trasferiti su elaborati esecutivi e modelli analitici.



- Il terzo metodo per la definizione di modelli sospesi fu sviluppato da Heinz Isler nel 1955 per la definizione della morfologia delle calotte in calcestruzzo armato, quindi strutture continue. Questa caratteristica fu simulata sospendendo ritagli di tessuto o membrana bagnati, congelati e quindi ribaltati. I risultati variano al variare del tipo di tessuto. Tra le strutture progettate da Isler durante la sua carriera, le più rappresentative sono la stazione di servizio di Deitingen costruita nel 1968 sull'autostrada Berna-Zurigo e la copertura del teatro all'aperto di Grotzinger costruita nel 1977, con un spessore di appena 11 cm. Questi sono i migliori esempi della leggerezza delle strutture definite con questa tecnica.



Tenciche di Form-Finding Digitali

Queste, insieme ad altre tecniche, permettono di progettare strutture che trasmettono le forze attraverso compressione o trazione assiale, mantenendo sezioni trasversali contenute. Purtroppo, queste tecniche sono complesse e richiedono tempo per essere costruite, relegandone l'utilizzo ad una ristretta cerchia di progettisti.

Grazie ai software di progettazione parametrica, queste tecniche tradizionali possono essere utilizzate in uno spazio digitale, creando ambienti che simulano il comportamento fisico dei corpi deformabili. Sviluppati inizialmente per l'animazione digitale o per simulare il movimento dei tessuti, i particle-spring systems (letteralmente sistemi particella-molla), sono successivamente stati sviluppati per diventare strumenti potenti per il form-finding; le simulazioni digitali permettono ai progettisti di condurre ricerche sulle forme in tempo reale, modificando le forze, i vincoli e le proprietà fisiche.

Un particle-spring system consiste nella discretizzazione di un modello continuo in un numero finito di masse (particles/particelle) connesse da springs (molle) perfettamente elastiche. Le entità principali che costituiscono un sistema siffatto sono:

- **Particelle:** ogni particella del sistema è una massa concentrata che cambia posizione e velocità durante la simulazione;
- **Molle:** è una connessione lineare elastica tra due particelle e che si comporta secondo la legge di Hooke, ha quindi una lunghezza iniziale a riposo ed un valore di rigidità k
- **Forze:** pesi propri e carichi esterni sono simulati da vettori applicati alle particelle;
- **Vincoli:** particelle che non modificano la loro posizione durante la simulazione.

Una volta iniziata la simulazione, le particelle si muovono dalla loro posizione iniziale fino a raggiungere uno stato di equilibrio che dipende dalla geometria iniziale, dai vettori forza e dalle proprietà delle molle. In accordo con la legge di Hooke, minore è il valore di rigidità k delle molle, maggiore è l'elongazione delle molle. Dal momento che le particelle si comportano come cerniere sferiche, senza quindi vincoli alla rotazione, le soluzioni rappresentano situazioni di equilibrio dove i carichi vengono distribuiti esclusivamente attraverso forze assiali, costituendo così la condizione ideale per le strategie di form-finding.

Per questo progetto, è stato utilizzato il plug-in integrato di Rhino Grasshopper "Kangaroo", un PSS di simulazione fisica sviluppato da Daniel Piker, in collaborazione con Rober Cervellone, Giulio Piacentino, che si contraddistingue per la semplicità d'uso e l'interfaccia designer-oriented.

5- ADD: ALGORITHM AIDED DESIGN

Il disegno come mezzo di comunicazione

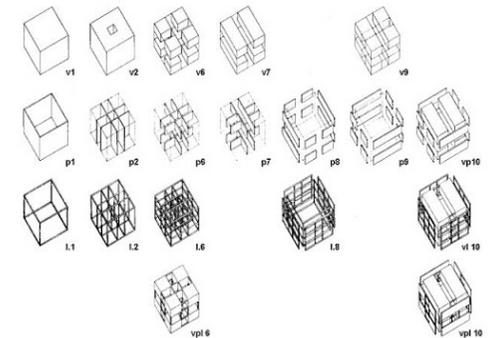
Gli architetti hanno da sempre utilizzato il disegno come mezzo progettuale e di comunicazione, differenziando così l'architettura dalla mera edilizia. Attraverso il disegno gli architetti organizzano le idee, le risorse, lo spazio ecc., ed è il disegno il risultato delle capacità dell'architetto di prevedere le conseguenze delle proprie scelte progettuali. Con lo sviluppo di nuovi metodi di rappresentazione sono emersi nuovi stili; basti pensare alle conseguenze della codifica delle regole della prospettiva nel Rinascimento e della geometria proiettiva nel movimento moderno. Le tecniche del disegno hanno però sempre fatto affidamento su una serie di strumenti che sono rimasti pressoché invariati nei secoli: carta, strumenti da disegno, squadre e compasso. In questo modello ogni atto creativo è tradotto in un alfabeto geometrico da gesti che stabiliscono un rapporto diretto tra idea e segno.

Il disegno tradizionale è un processo additivo, attraverso cui la complessità viene raggiunta aggiungendo e sovrapponendo segni indipendenti tra loro sulla carta. Non si possono quindi stabilire relazioni associative tra questi segni, e la coerenza interna del disegno non viene garantita dal mezzo stesso, ma viene affidata al progettista.

La logica additiva del disegno tradizionale comporta due limiti: il primo consiste nel fatto che l'atto del disegno differisce dai meccanismi cognitivi che sono alla base del processo creativo, che si basa sullo stabilire relazioni invece che sull'aggiungere informazioni. Il secondo riguarda il fatto che il disegno esclude gli aspetti fisici del mondo reale che regolano la generazione delle forme; per esempio, il disegno tradizionale non è in grado di gestire forze (come ad esempio la gravità) o i vincoli che condizionano e limitano le deformazioni e gli spostamenti. Questi limiti hanno condizionato le potenzialità del disegno e così i progettisti sono stati costretti a ripetere determinati processi comprovati invece di sperimentare ed innovare.

Inizialmente i computer non sono riusciti a superare questi limiti; i primi software CAD (Computer-Aided Design and Drafting) hanno semplicemente fornito la possibilità di eseguire compiti ripetitivi, senza però condizionare i metodi di progettazione. Questi metodi possono essere visti come la traduzione della logica additiva nel mondo digitale.

Negli anni '60 del XX secolo, l'architettura d'avanguardia cercò di superare i limiti del disegno per mezzo di vari metodi che rappresentassero le forze ed i processi che guidavano il processo generativo. Ne sono un esempio i diagrammi di Eisenman per la House IV, che definivano l'intera sequenza delle operazioni geometriche che portavano all'oggetto finale.



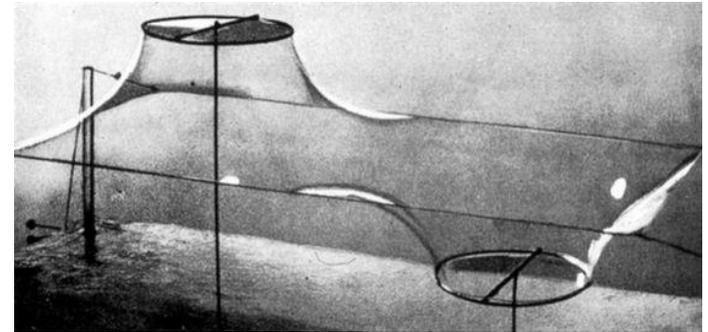
Form-Finding e Disegno

Il metodo di disegno convenzionale è stato il mezzo di comunicazione privilegiato per l'architettura per secoli. Esso subì un primo attacco da parte di nuovi approcci alla fine del XIX secolo, quando si cominciarono ad esplorare le prime tecniche di form-finding. Nel tentativo di esplorare ed ottimizzare nuovi tipi di strutture, furono sviluppate nuove tecniche che stabilivano relazioni complesse ed associative tra materiali, forme e strutture.

I primi pionieri furono Gaudì (1852-1926), Isler (1926-2009), Otto (1925-2015) e Musmeci (1926-1981), voltando le spalle alla progettazione guidata dalle tipologie per guardare ai processi naturali di auto-generazione con l'obiettivo di organizzare gli edifici secondo le medesime logiche. Per rappresentare questi processi, il disegno tradizionale non costituiva uno strumento valido.

Per questo motivo i pionieri del form-finding ricorsero all'uso di modelli fisici: film di sapone che generavano superfici minime, ritagli di tessuto sospesi che definivano volte sollecitate a sola compressione e strutture ramificate. Il disegno come mezzo di investigazione della forma fu essenzialmente rimpiazzato dalla definizione della forma condotta attraverso operazioni fisiche di form-finding operate su dispositivi che dimostrassero come le forze dinamiche potessero modellare forme architettoniche ottimizzate.

Negli ultimi decenni la complessità sempre crescente degli edifici ha fatto sì che le tecniche di form-finding diventassero una strategia importante nella determinazione della forma di strutture indeterminate. L'ottimizzazione strutturale operata tramite modelli fisici era però mono-parametrica, ovvero aveva come unico parametro la gravità, ma definì la traiettoria verso un approccio multi-parametrico, dove la forma è definita da dati eterogenei: geometria, forze dinamiche, ambiente e dati sociali.



Parametri: dalla logica additiva a quella associativa

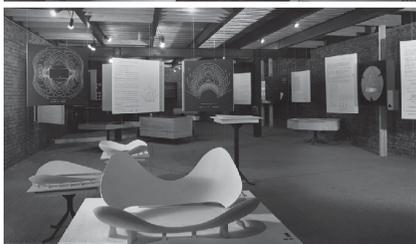
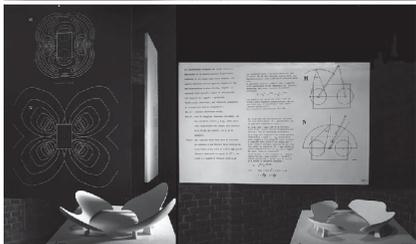
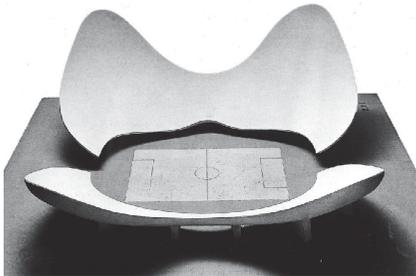


Fu Luigi Moretti, architetto italiano, ad usare per la prima volta il termine "Architettura Parametrica" nel 1939. La sua ricerca intitolata "Le relazioni tra dimensioni dipendenti da vari parametri" si concretizzò in un'esposizione dei suoi modelli di stadi di calcio, tennis e piscine olimpiche all'interno della Dodicesima Triennale di Milano del 1960. I parametri progettuali da lui presi in considerazione erano i coni visivi e la fattibilità economica dei progetti: la forma finale era generata calcolando pseudo isocurve, nel tentativo di ottimizzare la visibilità da ogni posizione all'interno degli stadi.

La ricerca di Moretti fu condotta in collaborazione col matematico Bruno De Finetti, con cui fondò l'Istituto di Ricerca Matematica in Architettura (I.R.M.O.U.)

"I parametri e le loro relazioni diventano il codice per un nuovo linguaggio architettonico, la "struttura" nel senso originale del termine. La definizione di parametri e delle loro relazioni deve essere supportata da tecniche e strumenti messi a disposizione dalle scienze più innovative, in particolare dalla logica, dalla matematica e dai computer. I computer danno la possibilità di esprimere i parametri e le loro relazioni reciproche attraverso una serie di procedure autocorrettive."

[F. Bucci e M. Mulazzani, Luigi Moretti opere e scritti (Milano: Electa, 2006)]



È evidente che Moretti avesse intuito la potenzialità del computer applicato alla progettazione. Fu nel 1963 che l'informatico americano Ivan Sutherland sviluppò lo "Sketchpad", definendolo un "sistema meccanico di comunicazione grafica", creando il primo programma CAD interattivo. Il software era progettato per esplorare le interazioni tra essere umano e macchina e permetteva ai progettisti di disegnare semplici primitive come punti, segmenti ed archi utilizzando una penna luminosa come input. Già allora, il software presentava caratteristiche ormai comuni nei tipici software CAD: la gestione dei blocchi, lo zoom e gli snap.

Inoltre, era basato su una logica associativa chiamata dei vincoli atomici: una caratteristica innovativa che semplificava i rapporti tra le entità digitali; per esempio, se due segmenti (o più propriamente due vettori) avevano come punto di applicazione lo stesso punto A, ogni movimento di A implicava un cambio di modulo e direzione nei vettori. Questi vincoli atomici potevano essere combinati per generare relazioni tra gli oggetti, superando i limiti della logica additiva del disegno tradizionale. Nonostante il software Sketchpad presentasse queste funzionalità, i primi software CAD commerciali non comprendevano i vincoli atomici, fornendo agli architetti uno strumento che di fatto digitalizzava il tavolo da disegno, aumentando semplicemente la velocità a cui determinate operazioni potevano essere ripetute e dando la possibilità di gestire diversi layers.

Modellazione tramite algoritmo

Dalla fine degli anni '80 ad oggi è avvenuta un'evoluzione profonda: la ricerca accademica e altre pratiche innovative, nel tentativo di sfuggire ai limiti dei software, hanno intrapreso nuovi modi di manipolare i software "dall'interno", cercando nuove soluzioni e forme attraverso la programmazione. Molti progettisti hanno quindi intuito che software più sofisticati potessero gestire livelli di complessità che superassero il potenziale umano definendo routine e procedure. Questo tipo di modellazione si basa sul linguaggio macchina, che esprime istruzioni in una forma tale da poter essere eseguite dal computer in una procedura step-by-step: l'algoritmo.

Un algoritmo è una serie finita di istruzioni espresse in linguaggio formale che, se eseguite correttamente ed in maniera ordinata, producono un risultato prevedibile. Gli algoritmi seguono la propensione dell'essere umano a scorporare un problema in un set di step semplici che possono essere computati facilmente. Nonostante gli algoritmi sono solitamente associati ai computers, essi possono essere definiti indipendentemente dai linguaggi di programmazione. Una ricetta può essere considerata un tipo di algoritmo, dove ogni istruzione è specificata in un linguaggio formale in modo da rendere eseguibile la realizzazione di un piatto.

Le caratteristiche di un algoritmo sono le seguenti:

- Un algoritmo deve utilizzare un linguaggio formale ordinato: il linguaggio utilizzato non deve contenere ambiguità e le istruzioni devono essere introdotte in un ordine specifico;
- Un algoritmo necessita di una serie di input definiti: gli input possono differire per tipo o per quantità, una specifica istruzione porta con sé uno o più specifici input;
- Un algoritmo ha come risultato uno specifico output;
- Se vi sono ambiguità nel linguaggio, l'algoritmo genererà messaggi o errori nell'editor specifico.

Il computer altro non è che una macchina programmabile in grado di eseguire qualsiasi tipo di algoritmo. La validità o meno di un algoritmo non è definita dal computer ma è intrinseca al set di istruzioni che lo compongono. Quindi il computer altro non è che un risolutore di algoritmi, che sfrutta il suo potenziale di calcolo per generare l'output una volta che le istruzioni e gli input vengono forniti nello specifico linguaggio.

Per immettere nel computer un algoritmo, vengono utilizzati editor specifici. Gli editor possono essere applicazioni autonome (C++ o Python) o possono essere incorporati in altri software come Rhinoceros e Autocad permettendo all'utilizzatore di scrivere le istruzioni ed automatizzare le operazioni.

Gli algoritmi possono fornire un'immensa varietà di output, che possono essere output numerici (in questo caso si parla di procedure di computazione) o output costituiti da variabili booleane (Si/No, Vero/Falso, 0/1) rendendoli in questo caso procedure decisionali.

Gli algoritmi possono inoltre fornire un output geometrico, se integrati in un software CAD o di modellazione, generando geometrie 3D create manipolando un insieme di primitive secondo una sequenza di istruzioni. Gli oggetti non vengono più manipolati dal mouse, ma sono definiti da procedure espresse nello specifico linguaggio del software: AutoLips in Autocad, RhinoScript in Rhinoceros, MEL in Maya. Un approccio di questo tipo viene definito Scripting.

La potenzialità di questo approccio non è limitata al solo output. Si potrebbe dire che algoritmi di questo tipo generano due output: il modello geometrico costituito da entità associative 2D e 3D e l'algoritmo in sé, che insieme costituiscono un modello interattivo digitale che risponde alle differenti variabili che manipolano l'intero sistema. Si può affermare quindi che la progettazione attraverso algoritmi permette agli utilizzatori di progettare processi, e non un singolo oggetto.

6- IL PADIGLIONE

"Il processo è più importante del risultato. Quando il processo è guidato dal risultato arriveremo solo in luoghi già esplorati. Quando il processo guiderà il risultato potremo non sapere dove stiamo andando, ma sapremo di volerci arrivare."

[Bruce Mau, Incomplete Manifesto for Growth, 1998]

L'algoritmo di progetto

La scelta di definire e modellare la struttura tramite algoritmi dipende dalla complessità della tipologia di manufatto scelto. Negli ultimi tre anni ho intrapreso uno studio sulla modellazione tramite algoritmi, utilizzando nello specifico il software Grasshopper contenuto in Rhinoceros 3d; da questo interesse scaturisce la volontà di affrontare il progetto di tesi tramite la modellazione algoritmica.

Questa scelta si traduce nella possibilità di avere in output un modello estremamente dettagliato, ma anche modificabile in tutti i suoi input. Questo significa poter modificare determinati valori forniti in input quali le dimensioni globali del manufatto e le dimensioni degli elementi costruttivi che lo costituiscono, permettendo quindi di procedere alla progettazione tecnologica in una modalità "aperta", dove le eventuali variazioni di forma e dimensioni dovute ad esempio ai risultati dei calcoli strutturali possono essere facilmente eseguite senza dover modellare l'intero manufatto dal principio.

La modellazione tramite algoritmi ha permesso inoltre di definire la struttura interna del pannello che costituisce il manufatto e di applicarla all'intero padiglione, testando così l'effettiva adattabilità del pannello ad un numero pressoché infinito di configurazioni e rendendo possibile quindi l'elaborazione della tecnologia in vista di molteplici applicazioni. Inoltre, la modellazione tramite algoritmo permette di ottenere in output una valutazione della quantità di materiali utilizzati, in modo da poter operare una valutazione economica del progetto.

Strutture con questo grado di complessità difficilmente possono essere concepite senza un approccio di questo tipo, questo è evidente più che in altre parti nella definizione del nodo di congiunzione tra pannelli. Non sarebbe possibile modellare elementi dalla morfologia così complessa senza avvalersi di strumenti che operano tramite algoritmi; la scelta di modellare il nodo utilizzando queste strategie ha permesso di indagare sul potenziale che la manifattura additiva (stampa 3d) può avere nel campo dell'architettura e dell'autocostruzione.

L'algoritmo sviluppato può essere suddiviso in quattro parti fondamentali:

- Da Boundary Representation a Mesh: in questa sezione l'input fornito all'algoritmo, una Brep (Boundary Representation) che rappresenta la traccia a terra della struttura, viene convertito in una Mesh i cui bordi rappresentano la struttura reticolare definita.

- Form-Finding: in questa sezione, utilizzando il plug-in Kangaroo 2, si definiscono i punti vincolati della Mesh e i punti dove invece viene applicato il carico.

- Struttura interna del pannello: dalla struttura ricavata mediante il procedimento di Form-Finding si modellano i listelli interni, il nodo interno, i listelli di bordo interni ed esterni, la tavola triangolare e il micelio.

- Nodi pannello-pannello: in questa sezione per ogni tipologia di nodo (illustrata precedentemente) viene definita una strategia per generare il nodo.

Da B-rep a Mesh

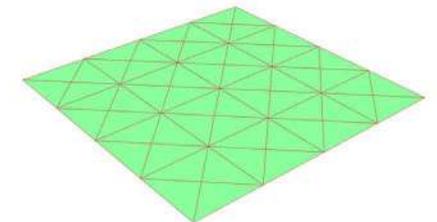
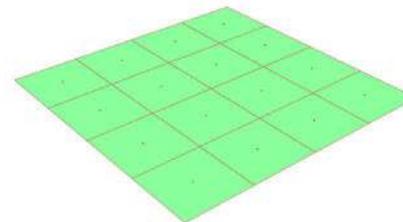
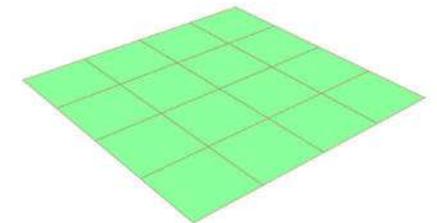
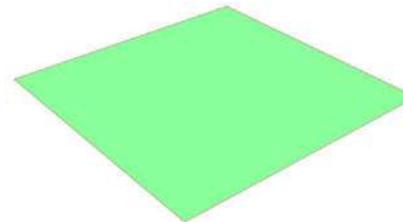
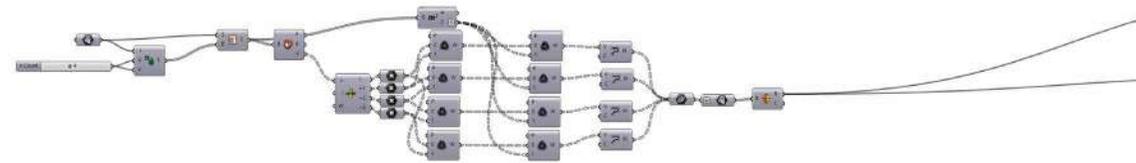
La scrittura dell'algoritmo si basa sull'immissione come input di una superficie (B-Rep) che rappresenti l'impronta a terra del manufatto. Nel caso del padiglione è stato scelto un quadrato di lato 16 m che costituirà una superficie coperta pari a 256 m².

Per portare avanti l'operazione di form finding è necessario definire una Mesh, ovvero un reticolo poligonale che definisce un oggetto nello spazio, composto da vertici, spigoli e facce. In questa fase è quindi possibile definire la forma del pannello che si andrà successivamente a modellare. Si è optato per definire una Mesh a facce triangolari per due motivi: l'indeforabilità della figura geometrica e la facilità di taglio del pannello in vista della realizzazione in autocostruzione, al fine di ridurre eventuali errori in fase di costruzione.

L'algoritmo esegue le seguenti operazioni:

- acquisizione dell'input;
- suddivisione della superficie in n isosuperfici;
- definizione dei vertici e dei centroidi di ogni isosuperficie;
- definizione del perimetro di ogni faccia tramite operazioni di Weaving (intreccio dati);
- fusione delle singole Mesh in un'unica Mesh composta da $n \times 4$ facce.

In output avremo quindi una Mesh a facce triangolari che ci permetterà di proseguire con le operazioni di Form-Finding.



Form-Finding

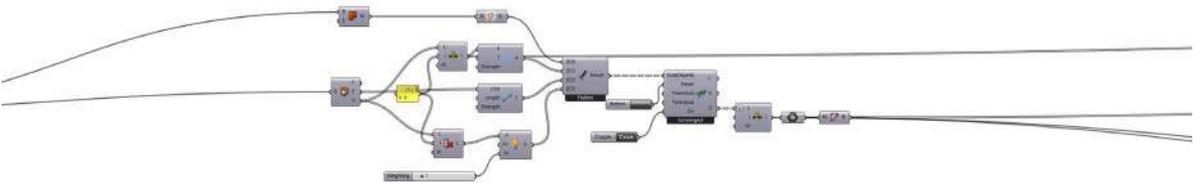
Una volta definita la Mesh è possibile proseguire con le operazioni di Form-Finding. In queste operazioni si è usufruito del plug-in Kangaroo, sviluppato secondo i principi dei Particle-Spring Systems (PSS), che tramite calcoli iterativi permettono di raggiungere uno stato di equilibrio in cui la somma delle forze è pari a zero. Questi calcoli iterativi sono condotti dai così detti Solvers, che operano all'interno di un Engine principale, in modo che ogni iterazione restringa la posizione e la velocità delle particelle dall'iterazione precedente verso una soluzione di equilibrio. Il plug-in Kangaroo è un motore PSS di simulazione fisica sviluppato da Daniel Piker.

Kangaroo permette ai progettisti di interagire con la forma attraverso simulazioni di PSS in tempo reale. Vi sono due metodi di interazione:

- Interazione diretta: include la manipolazione di vincoli, forze e proprietà delle aste (molle);
- Interazione Parametrica o Associativa: i vincoli, le forze e le proprietà delle aste sono collegate parametricamente ad altre componenti del modello 3d, ad esempio i vertici di un segmento definiti da altre parti dell'algoritmo.

L'algoritmo esegue le seguenti operazioni:

- definizione delle aste (molle) identificate come i segmenti che costituiscono le facce della Mesh, definizione del modulo di elasticità delle aste;



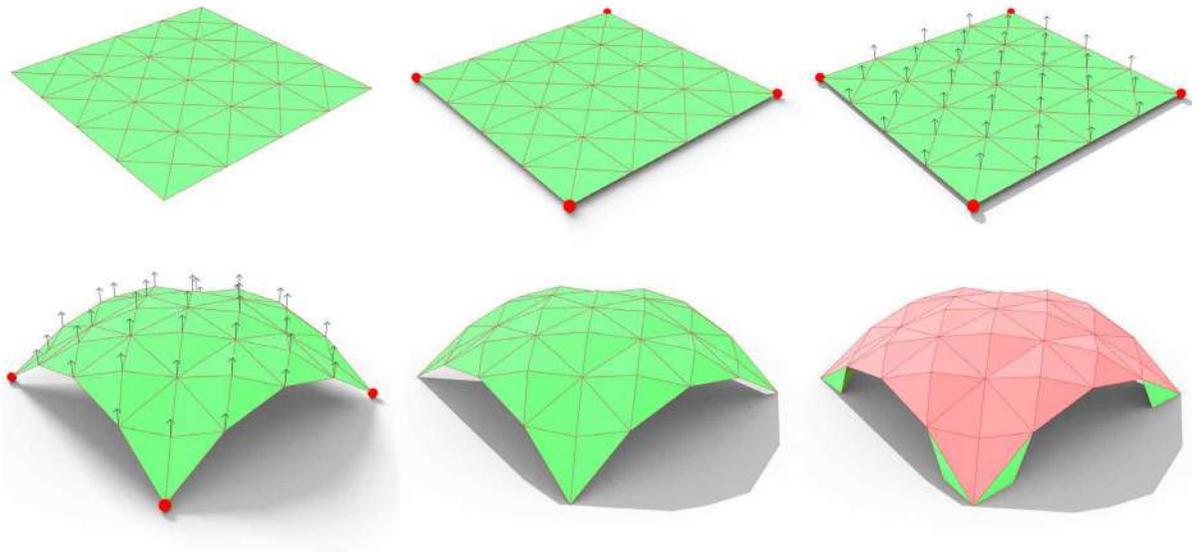
- definizione dei vincoli (punti di ancoraggio)
- definizione dei punti di applicazione del carico, il carico in questo caso rispecchia quello ipotizzato in fase di ottimizzazione strutturale e vale:

$$S = 16 \times 16 \text{ m} = 256 \text{ m}^2 = 2560000 \text{ cm}^2$$

$$Q_{\text{tot}} = q_r \times S = 0,015 \text{ daN/cm}^2 \times 2560000 \text{ cm}^2 = 38400 \text{ daN}$$

$$Q_c = Q_{\text{tot}} : 37 = 38400 \text{ daN} : 37 = 1038 \text{ daN}$$

- integrazione degli appoggi.



Output

L'algoritmo fino ad ora implementato fornisce quindi in output una configurazione strutturalmente efficiente che verrà successivamente sottoposta ad analisi strutturale ai fini del dimensionamento degli elementi portanti.

La superficie di output che definisce il padiglione è costituita da 76 pannelli triangolari, appoggi compresi.

Oltre a fornire una configurazione che permetta di studiare la tecnologia del pannello e dei nodi, l'algoritmo permette di avere un abaco dei pannelli triangolari che andranno a definire la struttura.

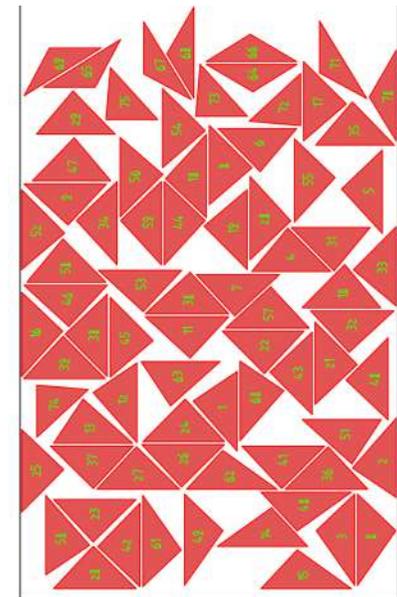
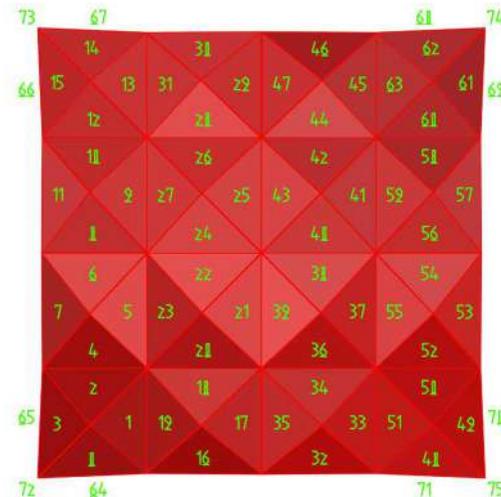
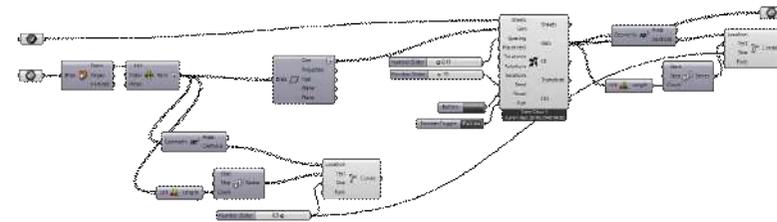
Inoltre tramite operazioni di Nesting è possibile sviluppare un metodo di organizzazione dei pannelli triangolari in modo da minimizzare lo spreco di materiali durante il taglio dei pannelli. Questa operazione si basa sull'uso di plugin nell'interfaccia Rhino.

L'algoritmo esegue le seguenti operazioni:

- catalogazione dei pannelli per numerazione
- definizione dell'area su cui ribaltare i pannelli;
- operazione di nesting;
- corrispondenza tra pannelli ribaltati e pannelli originali tramite numerazione.

In questo modo in fase di realizzazione è possibile ridurre gli sprechi di materiale.

E' inoltre possibile definire un metodo di catalogazione che semplifichi la fase di montaggio dei pannelli.



7- IL PANNELLO

Requisiti del pannello

La definizione della struttura interna del pannello è stata condotta perseguendo determinate necessità costruttive e strutturali.

In primo luogo è stata operata una scelta per quanto riguarda i materiali utilizzati seguendo i principi della sostenibilità, ricercando materiali con basso impatto sull'ecosistema, scartando così profili in leghe metalliche e simili, inoltre la capacità del micelio di penetrare le pareti cellulari di materiali lignino-cellulosici ha condizionato questa scelta, facendola ricadere sul legno strutturale. Le specie fungine scelte prediligono legni duri o semi-duri e per questo motivo è stato scelto il legno di Pioppo di Classe C24 (secondo la NTC 2018). In questo modo è possibile produrre pannelli costituiti da materiali sostenibili e biodegradabili.

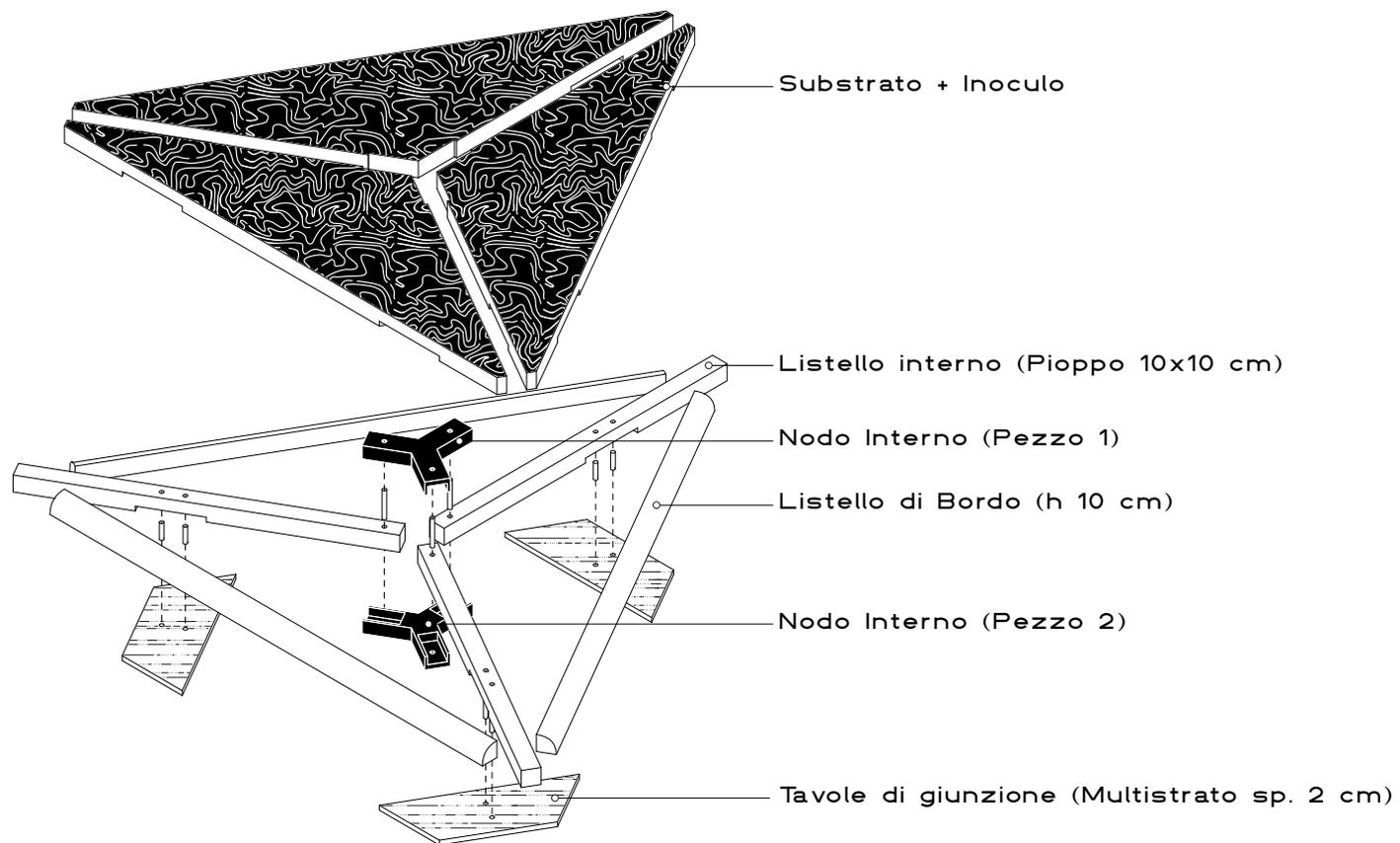
La seconda necessità è di pensare la struttura interna del pannello in legno in modo che vi si possa di posizionare il substrato e l'inoculo per il tempo necessario alla colonizzazione in modo da avere una corretta aderenza tra micelio e legno, arrivando quindi ad avere un pannello in materiale composito.

Una terza necessità ha guidato la fase di definizione della struttura del pannello, ovvero la volontà di sviluppare una tecnologia che fosse realizzabile in autocostruzione, mediante l'uso di macchinari facilmente reperibili e utilizzabili da manovalanza non specializzata. In fase di progettazione sono state valutate circa quindici diverse configurazioni di pannello, tentando di semplificarne sempre di più le operazioni di costruzione valutando sin dal principio il possibile errore in fase di realizzazione.

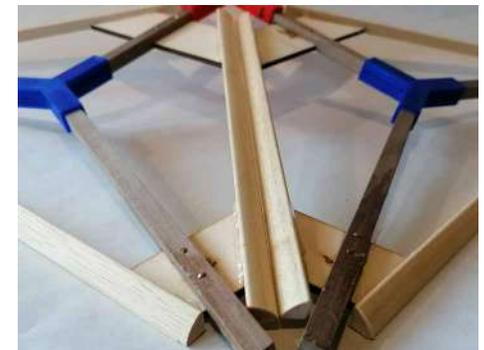
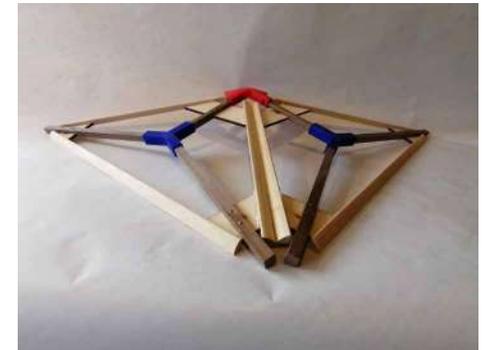
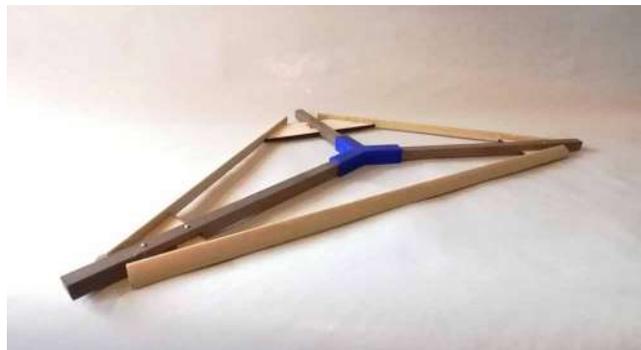
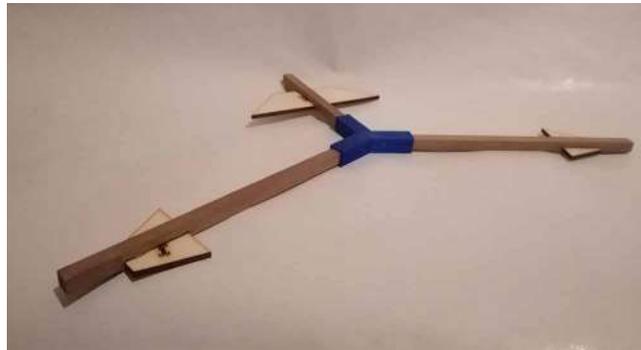
Se in una prima fase si è tentato di definire incastri legno-legno tra gli elementi che costituiscono il pannello, si è successivamente optato per l'inserimento di un terzo tipo di lavorazione per la realizzazione di un nodo interno, che ha trovato nella manifattura additiva la tecnica di realizzazione di questi oggetti. Questa fase verrà trattata nel prossimo capitolo, relativo alla definizione dei nodi.

Di seguito sono indicate tre configurazioni di pannello.

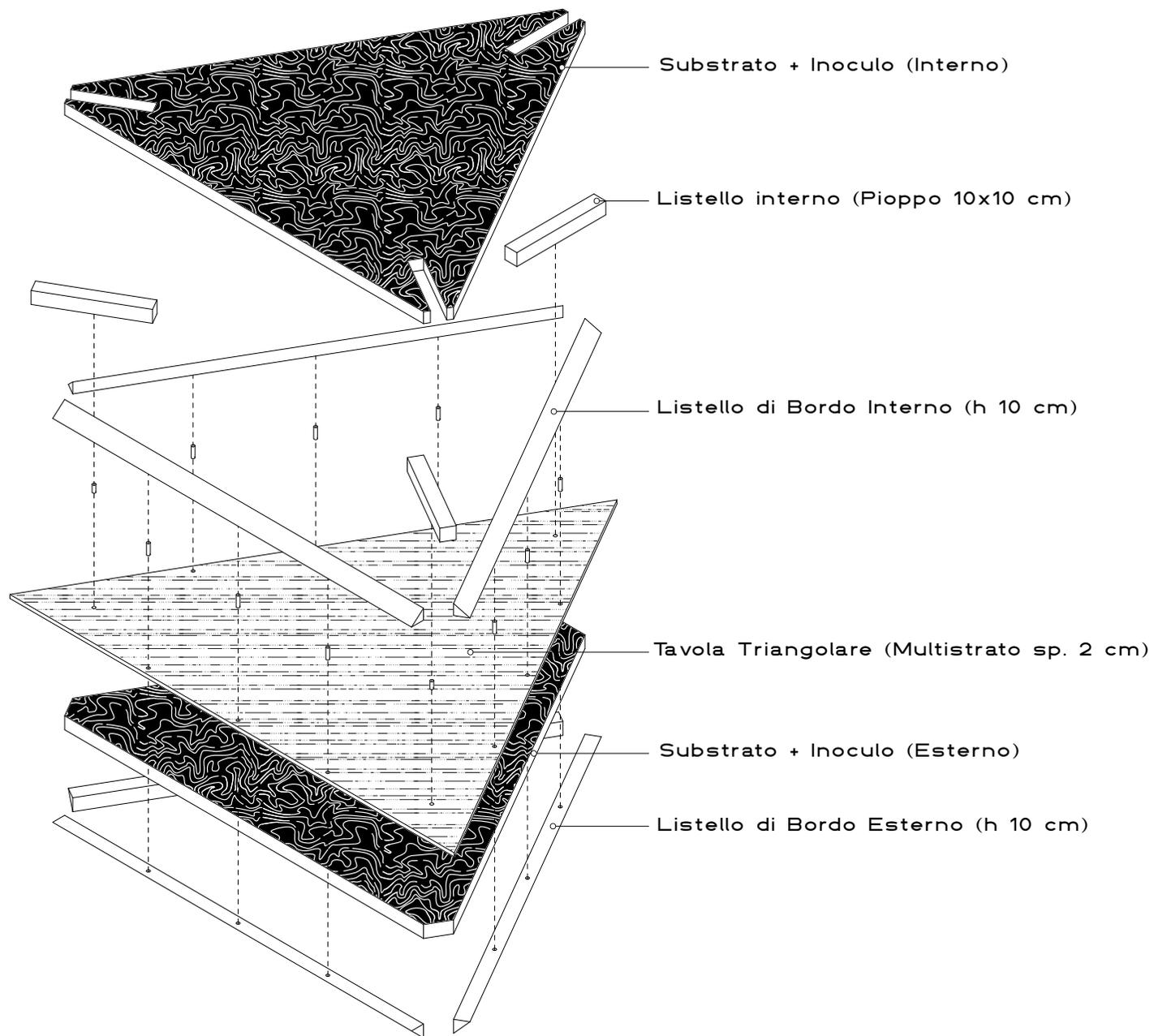
Pannello 13



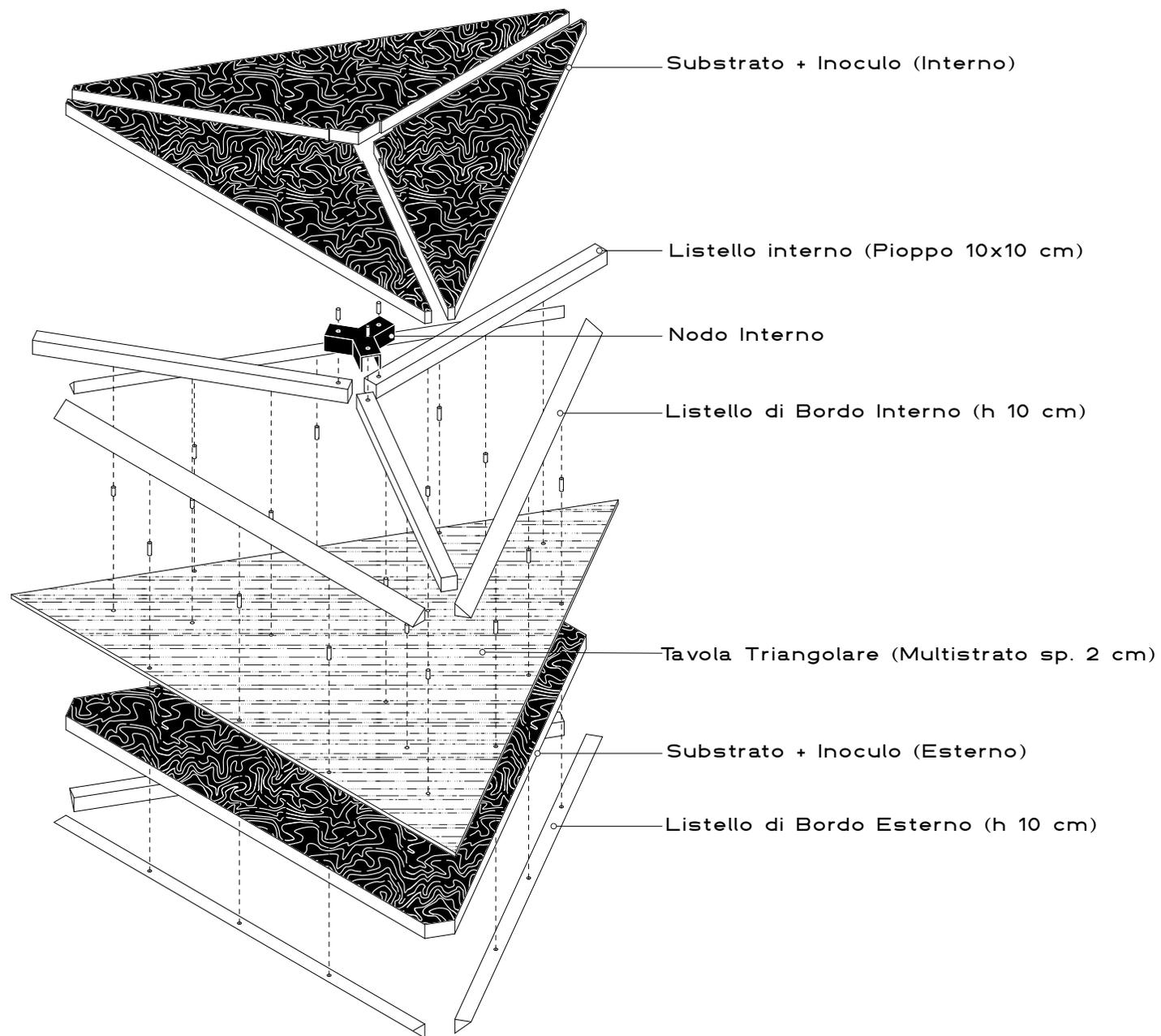
Modello di studio



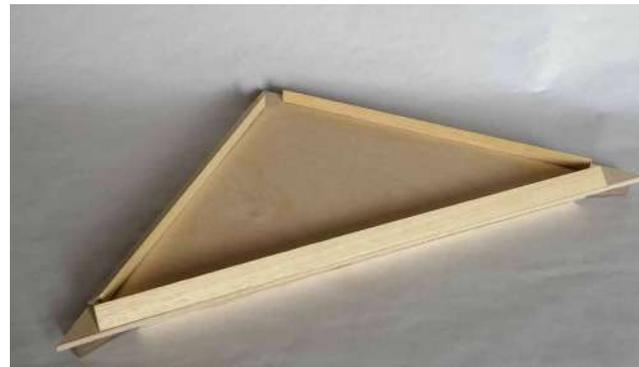
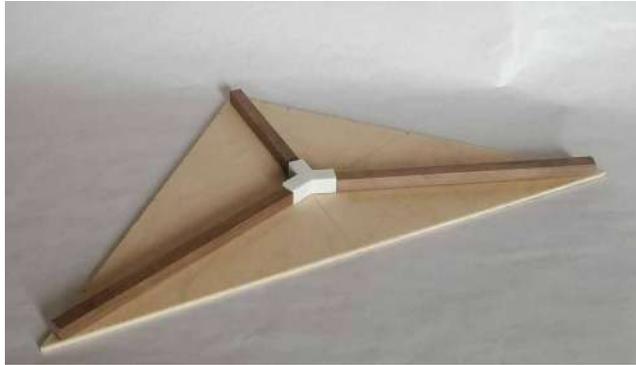
Pannello 14



Pannello Finale



Modello di studio



L'algoritmo del pannello: i listelli

La scrittura di un algoritmo per la definizione della struttura interna del pannello permette di applicare all'output del processo di Form-Finding una serie di istruzioni che in output fornisca un modello estremamente dettagliato del manufatto finale.

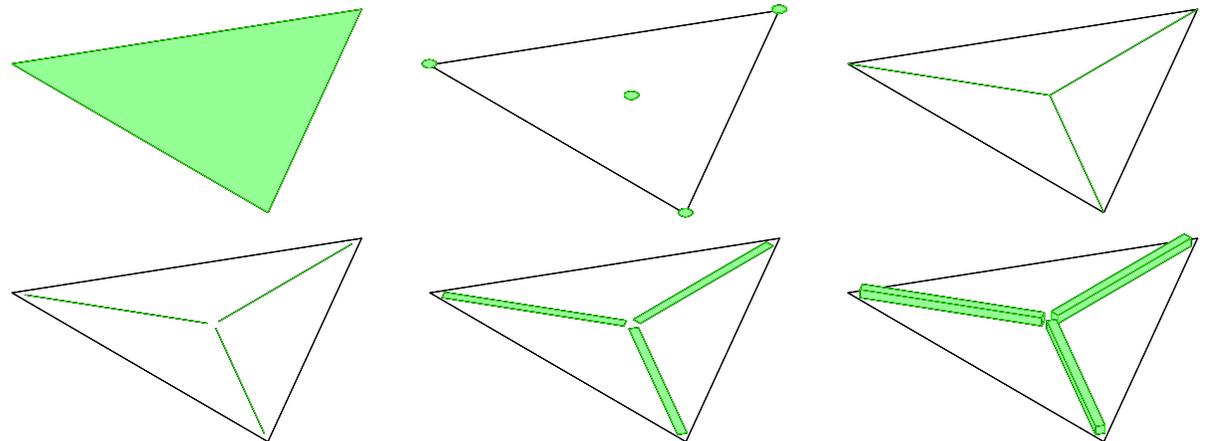
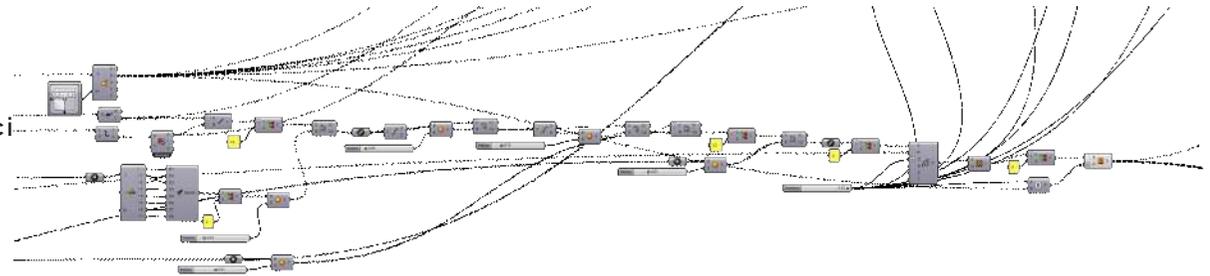
Questa fase di scripting assicura che la tecnologia del pannello aderisca effettivamente alla forma definita in precedenza.

Le operazioni eseguite dall'algoritmo hanno natura biunivoca, ovvero i dati che vengono manipolati costituiscono uno schema ad albero ordinato che permette di applicare ad ogni triangolo fornito come input determinate operazioni i cui output mantengono la stessa struttura dei dati precedenti.

L'algoritmo esegue le seguenti operazioni:

- acquisizione in input del triangolo;
- esplosione della curva in segmenti e vertici e definizione del suo centroide;
- segmento tra vertici e centroide;
- ridimensionamento del segmento;
- offset di valore l (spessore del listello);
- estrusione della curva per un valore l ;

L'output di questa parte dell'algoritmo permette di fare una stima dei metri lineari di listelli di legno da utilizzare per la realizzazione;



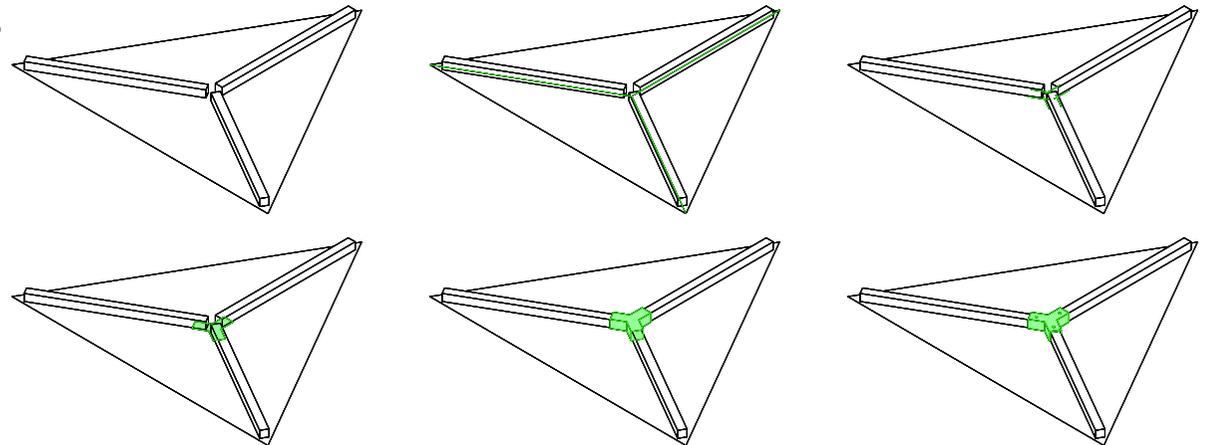
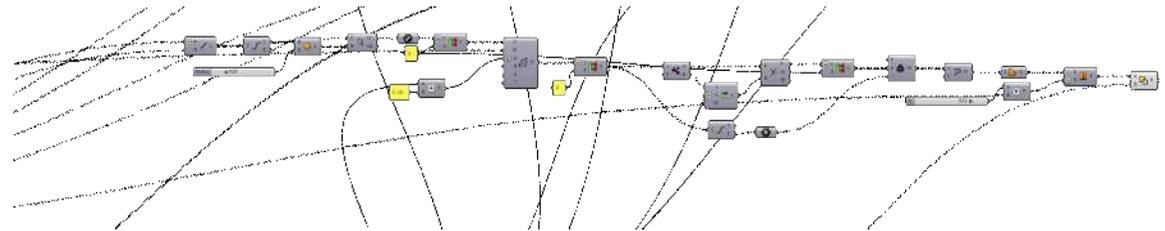
L'algoritmo del pannello: nodo interno

La definizione del nodo interno al pannello permette di avere in output un modello 3d del nodo, che in fase di realizzazione verrà prodotto tramite stampa 3d utilizzando filamenti appositi (PLA caricati al carbonio, PLA caricati al grafene o filamenti di Nylon)

L'algoritmo esegue le seguenti operazioni:

- acquisizione delle direttrici dei listelli;
- intersezione tra segmenti e sfera di diametro d pari alla dimensione del nodo finale ;
- offset sul piano di un valore l (spessore listello) + s (spessore della parete del nodo);
- individuazione delle intersezioni tra segmenti;
- Weaving dei dati in modo da definire una polilinea chiusa;
- estrusione in direzione normale al pannello per un valore pari ad $l+s$;
- sottrazione del volume dei listelli dal volume del nodo.

Questo tipo di modellazione permette di avere modelli 3d accurati per ognuno dei nodi interni al pannello; questi modelli 3d sono necessari alla produzione dei nodi tramite manifattura additiva.



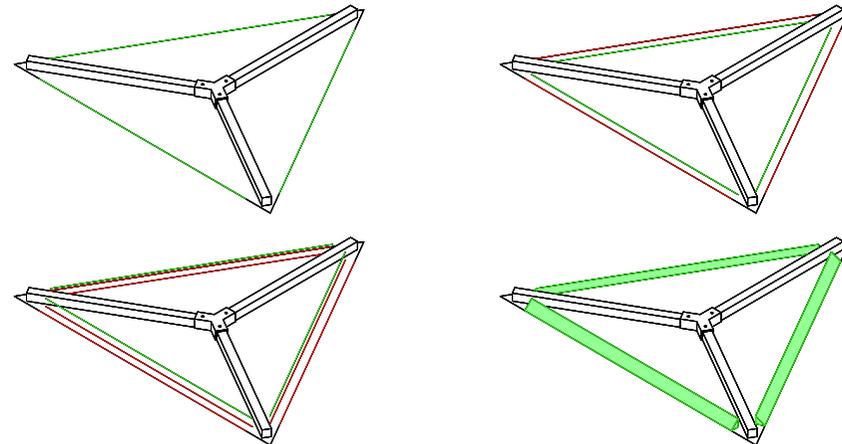
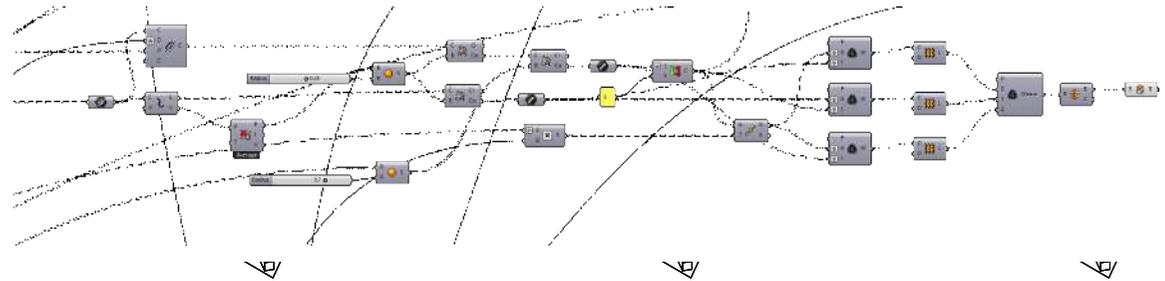
L'algoritmo del pannello: listelli di bordo

I listelli di bordo assicurano aderenza tra pannelli e permettono di posizionare il substrato in fase di colonizzazione.

L'algoritmo esegue le seguenti operazioni:

- acquisizione in input del triangolo;
- esplosione della curva in segmenti ;
- ridimensionamento dei segmenti;
- offset sul piano di un valore l (spessore listello);
- spostamento del segmento in direzione normale al piano del triangolo di valore l ;
- loft delle tre curve in modo da definire un listello a sezione triangolare retta;

L'output di questa parte dell'algoritmo permette di fare una stima dei metri lineari di listelli di legno da utilizzare per la realizzazione;

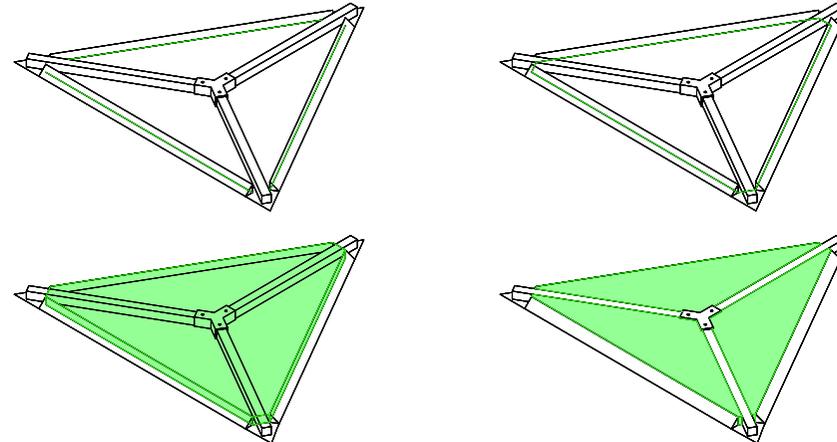
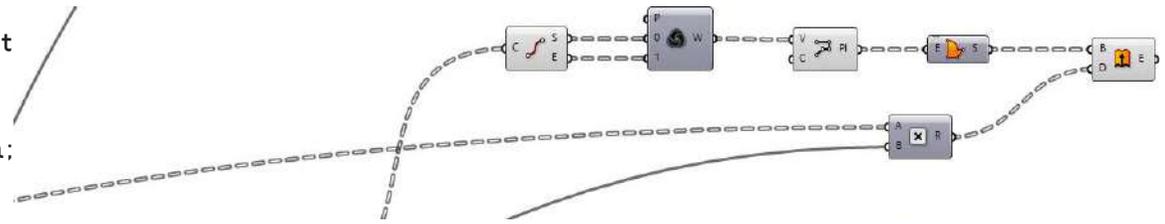


L'algoritmo del pannello: il micelio

L'algoritmo esegue le seguenti operazioni:

- acquisizione in input dei segmenti in offset per la modellazione del listello di bordo;
- esplosione della segmenti in vertici;
- Weaving che definisca una polilinea chiusa;
- estrusione di un valore l (altezza listello) in direzione normale al piano del triangolo;
- sottrazione dal volume così definito dei volumi dei listelli interni e del nodo interno;

L'output di questa parte dell'algoritmo permette di fare una stima del volume di substrato e quindi di inoculo necessario alla realizzazione.



8- IL NODO

Tipologie di nodo

La tecnologia del nodo è strettamente connessa a quella del pannello. Volendo definire un sistema di pannelli prefabbricati componibili in situ e smontabili una volta completato il ciclo di vita del manufatto, il nodo rappresenta non solo il sistema di connessione tra i pannelli ma è l'elemento che definisce la morfologia della struttura in sé.

Il nodo è un elemento complesso, esso infatti viene definito in base al numero di elementi che vi convergono, dove ad ogni elemento corrisponde un piano geometrico, in modo tale che il nodo appartenga a tutti i piani; per questo motivo è stato da subito necessario produrre una struttura di studio caratterizzata da una determinata configurazione di nodi in modo da poter definire una strategia di modellazione.

La struttura definita presenta diverse tipologie di nodo, a seconda del numero di listelli che vi convergono:

- Nodi interni al pannello, tre bracci (NI)
- Nodi a quattro bracci (N4)
- Nodi ad otto bracci (N8)
- Nodi di bordo, quattro bracci (NB)
- Nodi d'appoggio a due bracci (N2)
- Nodi di bordo a cinque bracci (N5)
- Nodi d'appoggio di spigolo (NS)

Non sarebbe stato possibile definire un abaco coerente di nodi senza l'uso della modellazione tramite algoritmo, se i nodi fossero stati definiti a priori sarebbe stato estremamente macchinoso adattarli alle varie strutture. La modellazione tramite algoritmo è quindi l'unica strategia possibile che permetta alla tecnologia di adattarsi alle strutture che così possono essere pensate con la massima libertà progettuale.

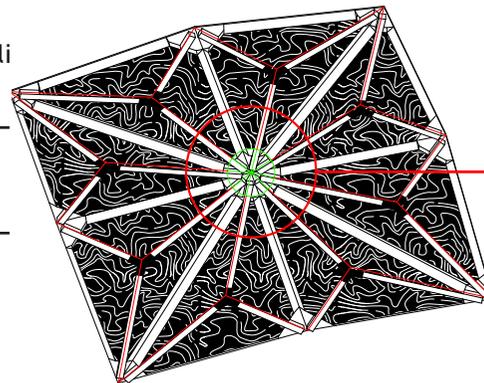
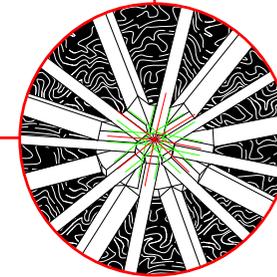
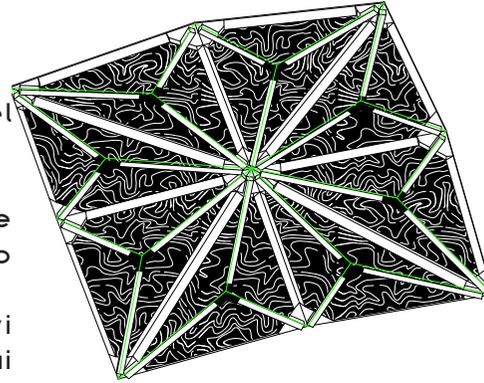
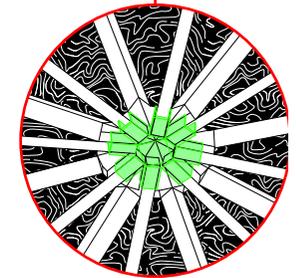
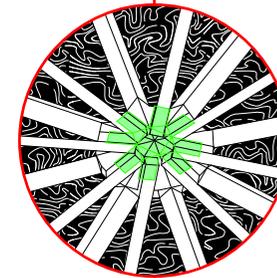
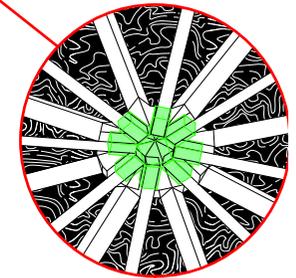
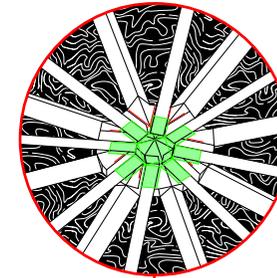
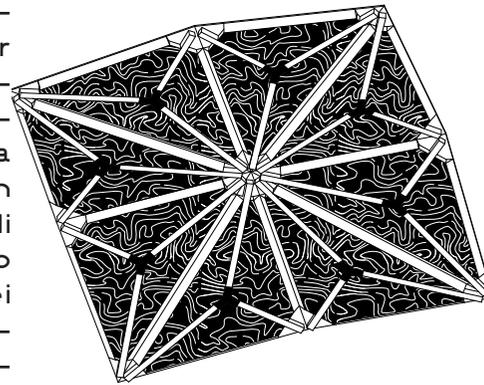
In un primo momento si sono immaginati nodi in legno o in elementi prefabbricati in acciaio, ma è apparso subito chiaro che per raggiungere un buon livello di versatilità fosse necessario usufruire di una tecnologia più complessa. Si è quindi optato per lo studio di una tipologia di nodo che fosse realizzabile tramite tecniche di produzione additiva.

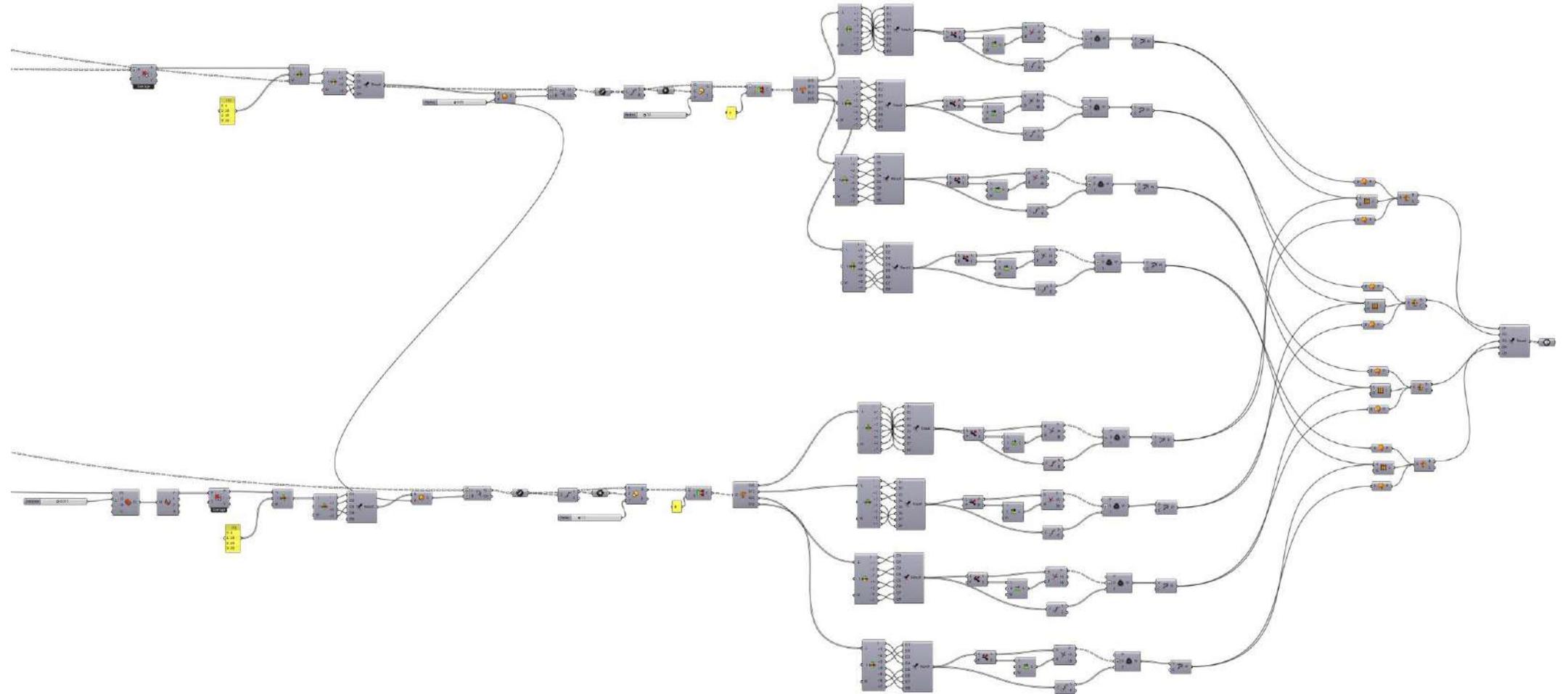
L'algoritmo

L'algoritmo di modellazione del nodo è quello più ostico in fase di scripting. Mentre per il pannello sussiste una corrispondenza biunivoca tra il triangolo e la sua struttura interna, per il nodo bisogna stabilire il rapporto tra numero di aste che vi convergono e i piani in cui esse sono contenute. La strategia è quindi stata quella di suddividere i nodi per numero di bracci e costruire una sfera con centro nei punti in cui le aste convergono, in modo da intersecare le direttrici dei listelli interni e suddividere quindi in gruppi di dati, la cui classe corrisponde al numero di bracci.

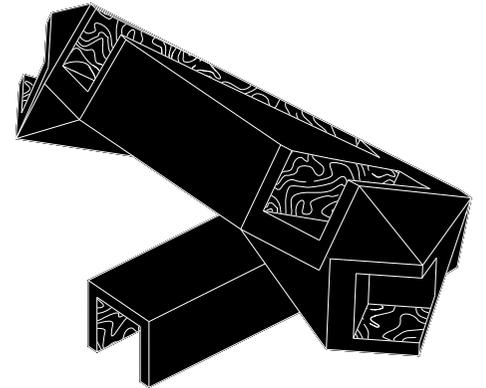
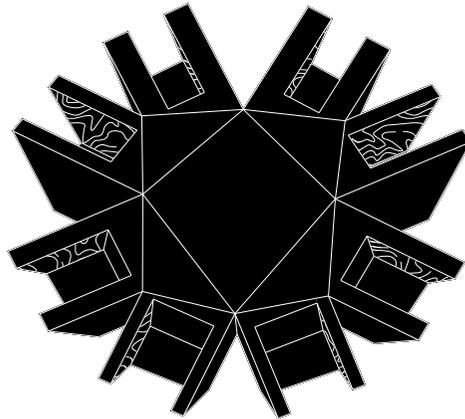
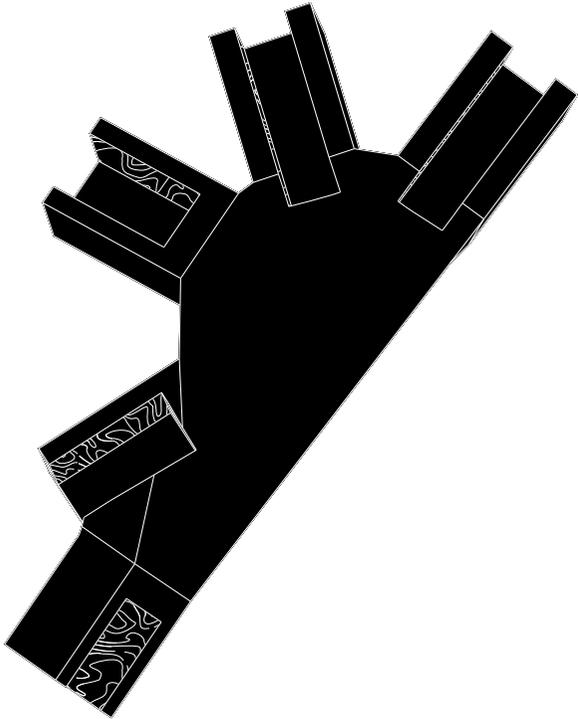
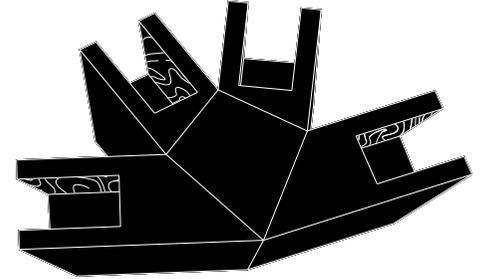
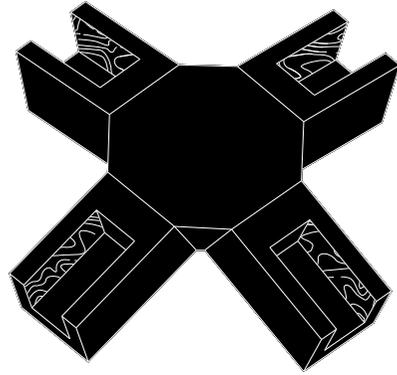
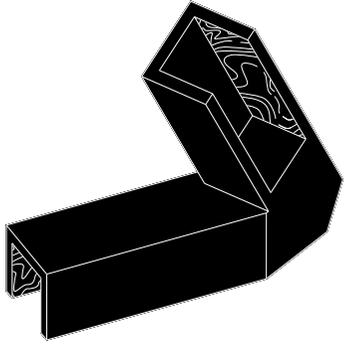
L'algoritmo esegue le seguenti operazioni:

- costruzione di una sfera di raggio r nel punto di convergenza delle direttrici;
- intersezione tra sfera e direttrici;
- manipolazione dei dati in modo tale che le direttrici siano in ordine congruente (orario o antiorario)
- manipolazione dei dati in modo tale che vi sia corrispondenza tra direttrici e piani su cui esse giacciono;
- offset di valore l (spessore listello) + s (spessore parete del nodo) per tutte le direttrici nel piano in cui esse giacciono;
- determinazione delle intersezioni tra gli offset;
- weaving dei vertici con i punti di intersezione e generazione di una polilinea chiusa;
- estrusione della curva
- sottrazione del volume dei listelli dal volume del nodo.





Abaco dei nodi



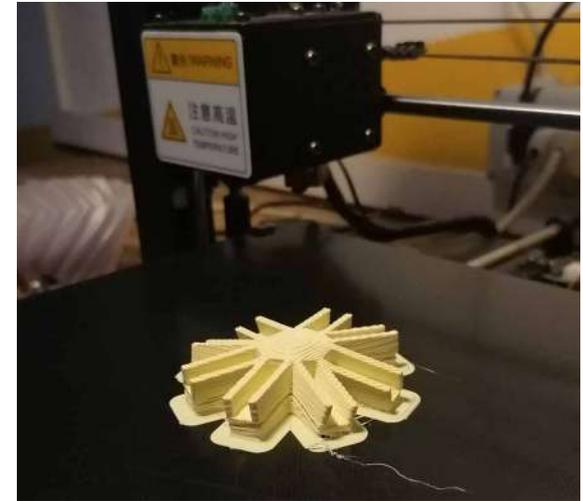
Manifattura Additiva e Stampa 3d

Le recenti innovazioni hanno permesso l'emergere di una nuova serie di tecnologie definite di manifattura additiva (Additive Manufacturing o AM). Una tecnica rivoluzionaria che potrebbe porre fine alle tendenze degli ultimi due secoli in temi di produzione, con profonde conseguenze geopolitiche, economiche e sociali.

Il principio alla base di questa tecnologia consiste nell'aggiungere strato per strato materiale (processo additivo) invece di sottrarlo da un blocco (processo sottrattivo). Questa differenza apparentemente superficiale in realtà cambia profondamente il processo di produzione.

- Le catene di montaggio possono essere ridimensionate o completamente eliminate per molti prodotti. Il prodotto finale o una sua grande parte possono essere prodotti tramite manifattura additiva in un unico processo a differenza della produzione convenzionale in cui vengono assemblate centinaia di migliaia di pezzi. Questi pezzi sono spesso spediti da dozzine di industrie in giro per il mondo, che a loro volta potrebbero aver assemblato i loro pezzi con pezzi prodotti da altre industrie;
- Non sarebbero più i prodotti ad essere movimentati, ma i progetti, sotto forma di file digitali che verrebbero stampati ovunque da qualsiasi stampante che soddisfi i parametri progettuali. Internet ha eliminato le distanze per la movimentazione di informazioni ed ora la AM ha il potenziale di eliminare il fattore distanza per il mondo materiale;
- I prodotti potrebbero essere stampati su richiesta eliminando la necessità di redigere inventari di nuovi prodotti o di pezzi di ricambio;
- Un solo impianto di produzione avrebbe il potenziale di stampare un range enorme di tipologie di prodotti senza la necessità di riorganizzare le linee produttive, con la possibilità di modificare i pezzi senza costi aggiuntivi;
- La produzione e la distribuzione di prodotti materiali potrebbe essere de-globalizzata riportando la produzione vicino al consumatore;
- L'impronta ecologica dell'industria manifatturiera e del trasporto verrebbe enormemente ridimensionata;

La tecnologia additiva rappresenta uno strumento potente di produzione di manufatti complessi con risoluzione estremamente alta, perseguendo comunque principi di sostenibilità; è stata per questo selezionata ai fini di questa tesi, rendendo possibile inoltre la costruzione di vari modelli di studio in scala.

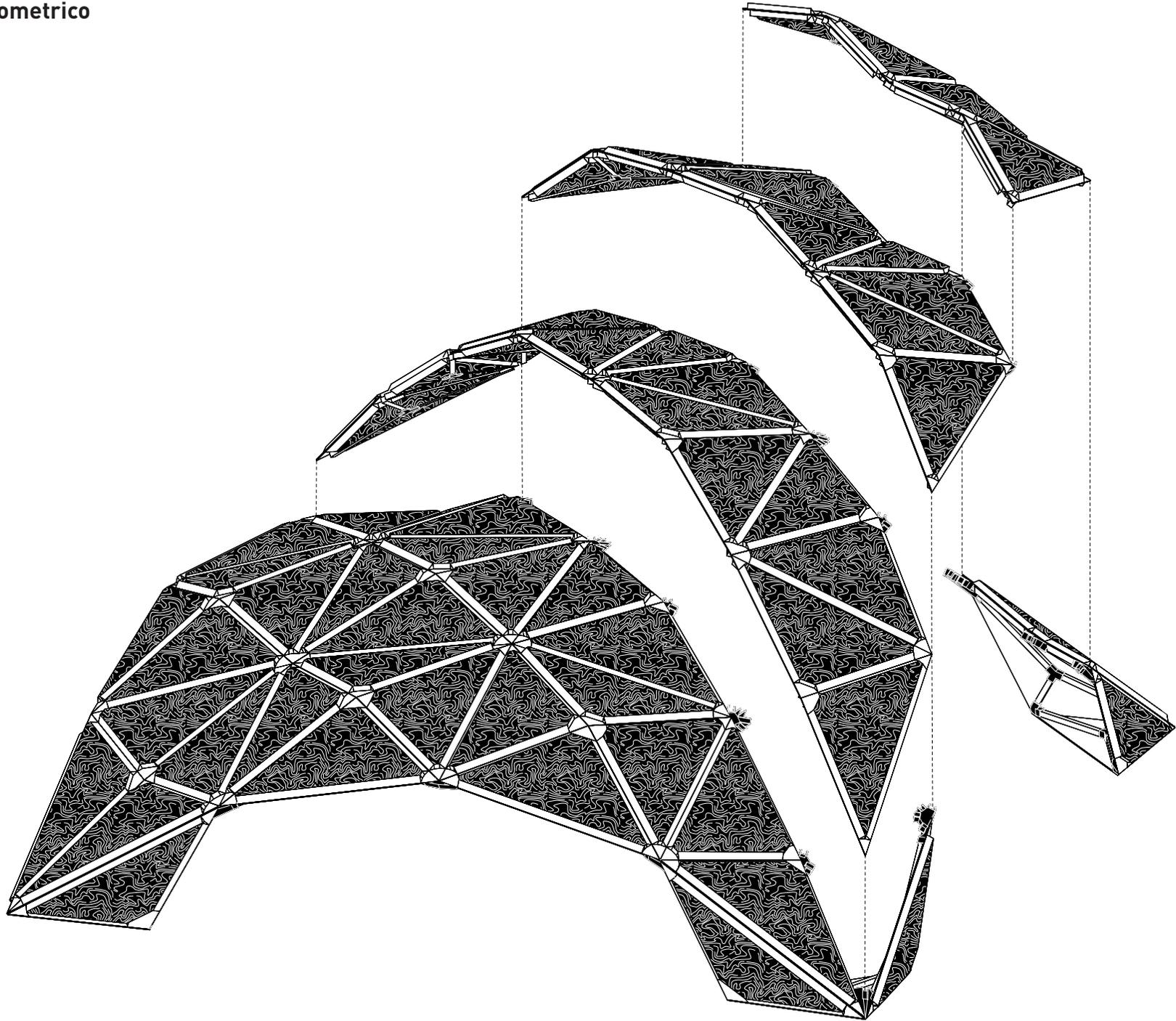


Se le tecniche di manifattura additiva in piccola scala hanno permesso di testare l'efficienza dell'algoritmo nella modellazione degli elementi di giunzione tra pannelli, le stesse metodologie possono essere applicate alla scala reale.

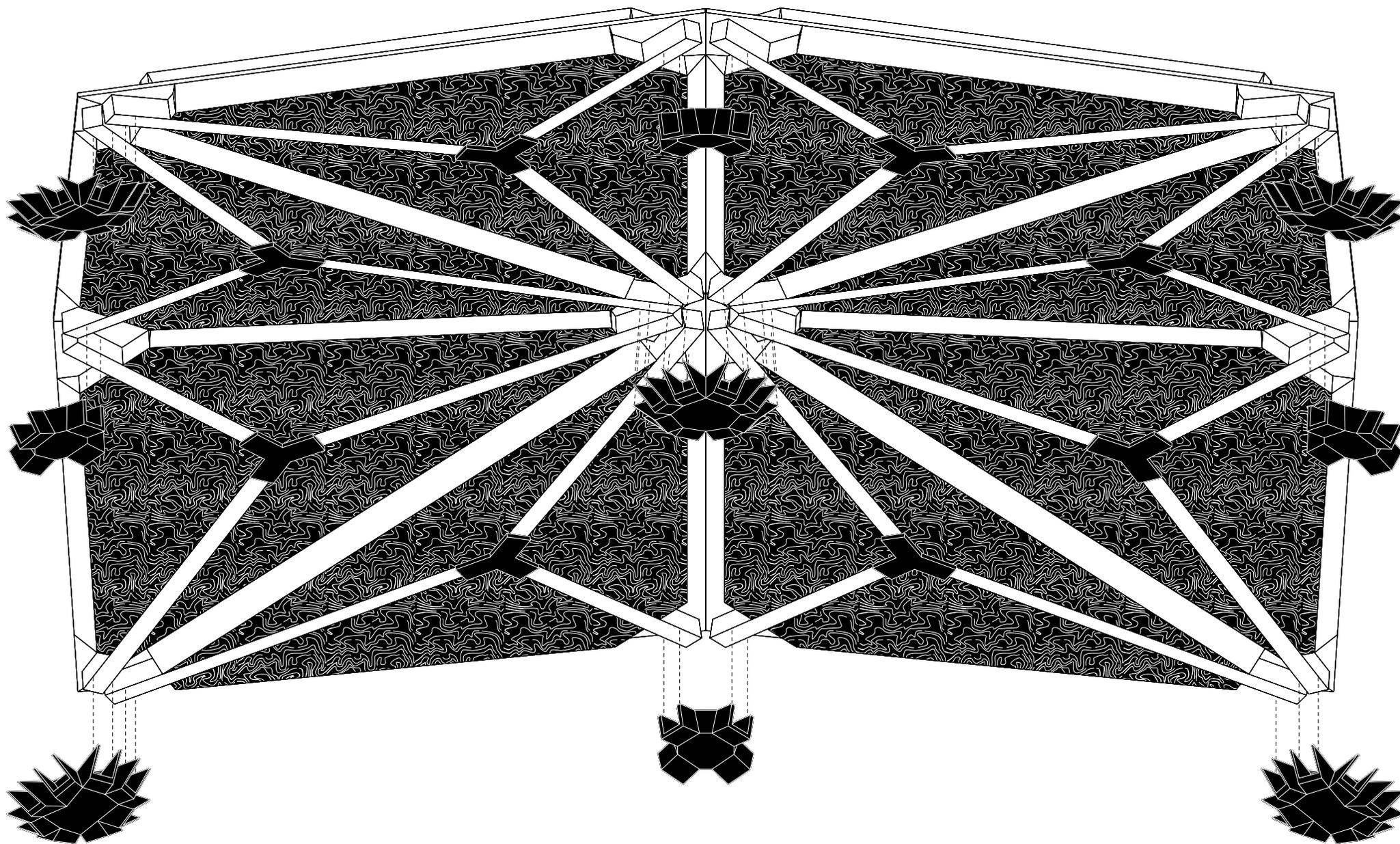
Macchinari di questo tipo sono in grado di stampare pezzi per la produzione di moto, automobili e addirittura imbarcazioni. Al fine di utilizzare questa tecnologia per la produzione dei nodi di giunzione delle strutture progettate, si è immaginato di utilizzare filamenti a performance aumentata, ad esempio filamenti in PLA caricati al carbonio o al grafene, o filamenti in nylon.

9- IL PROGETTO

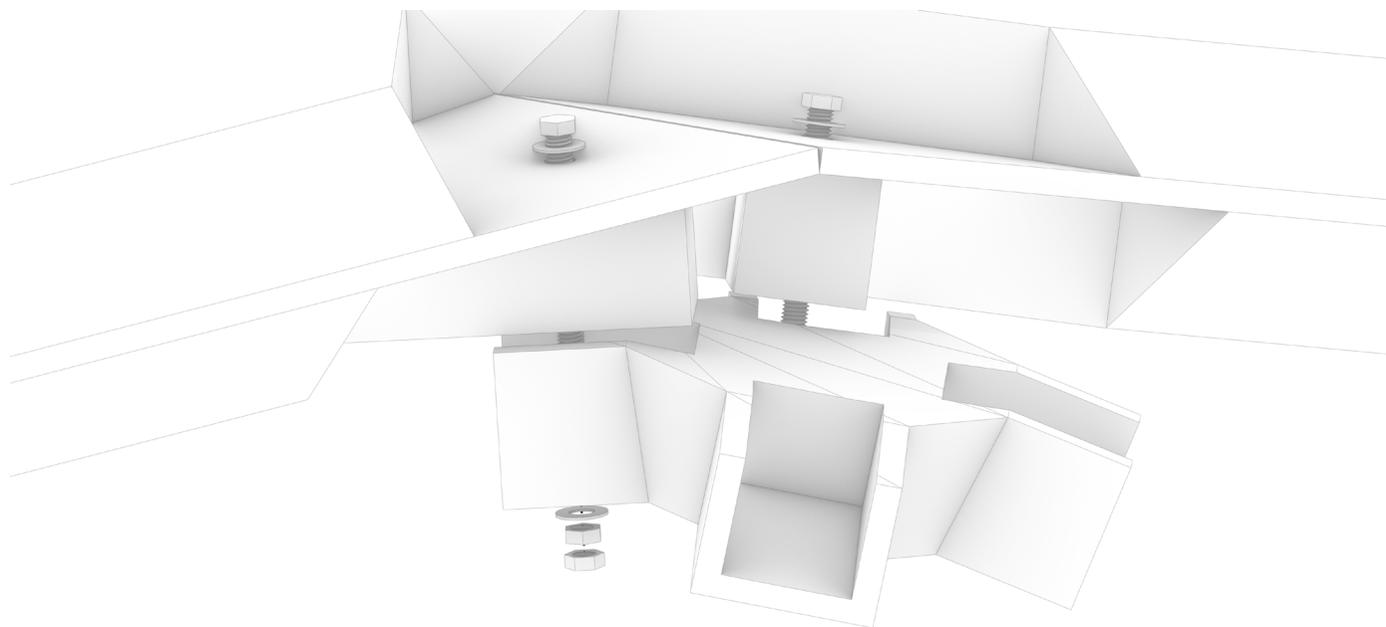
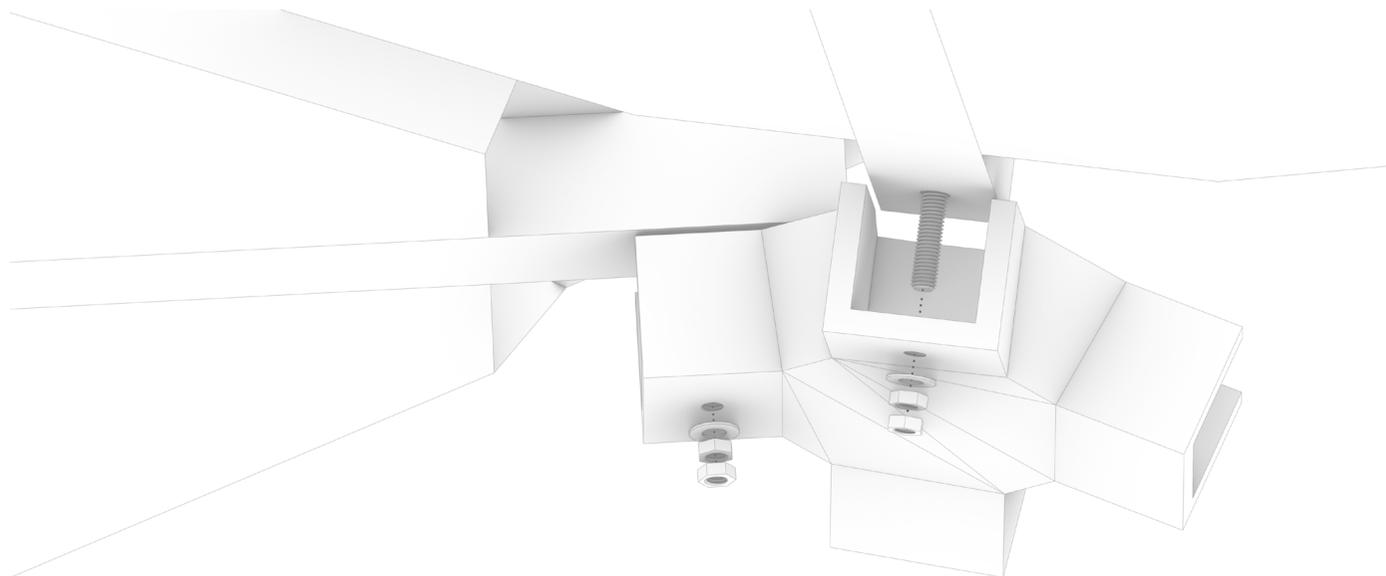
Esploso assonometrico



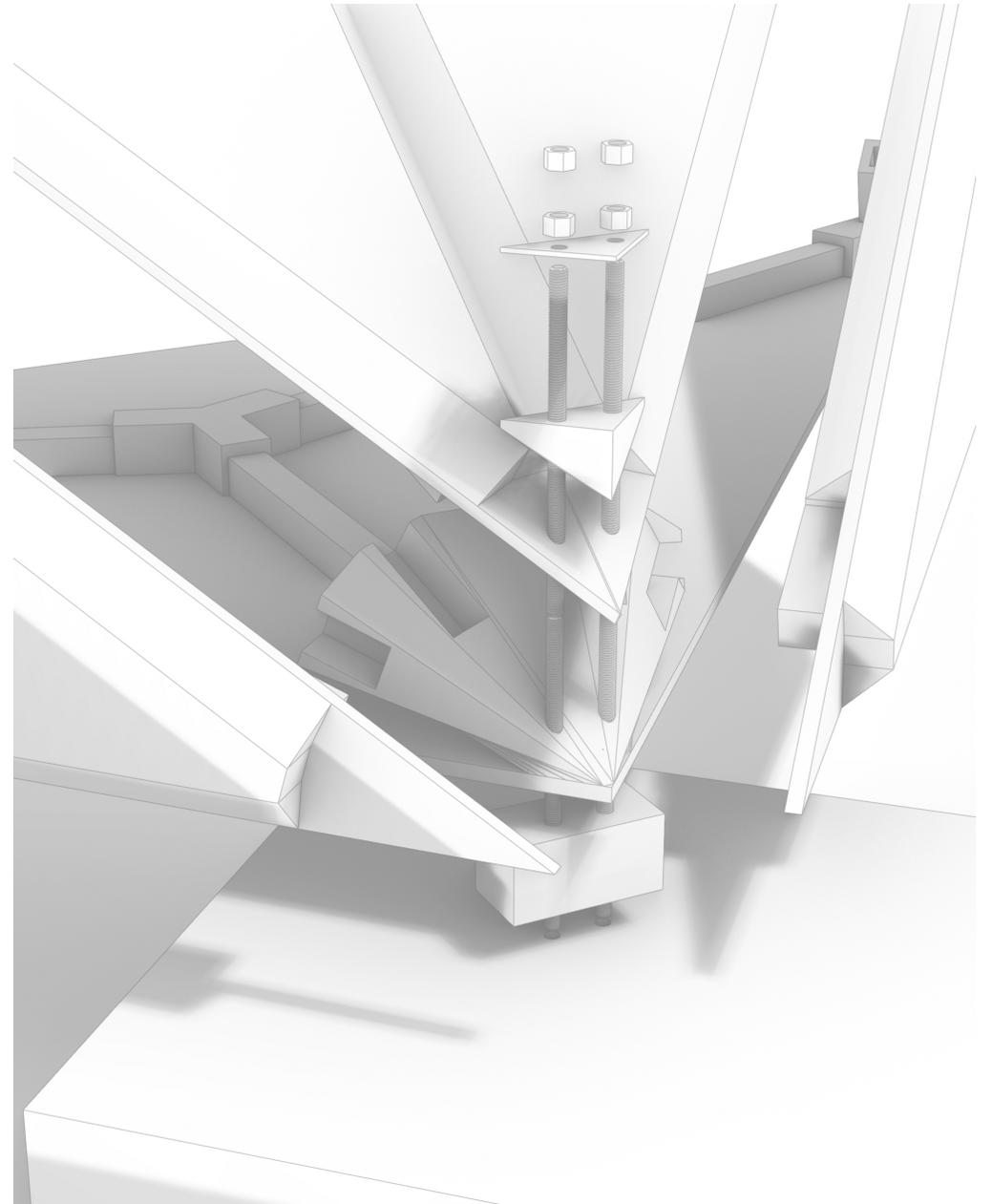
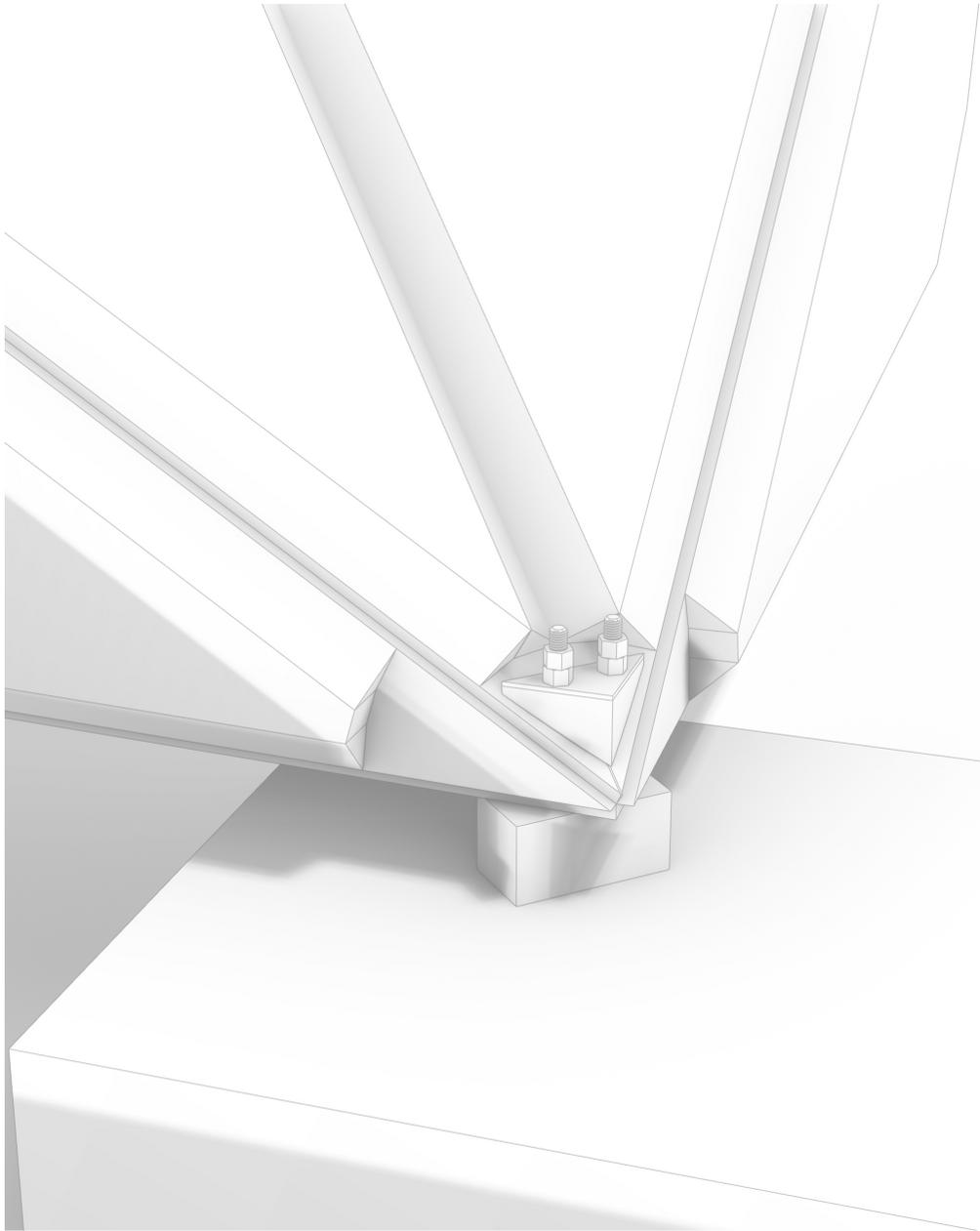
Schema di montaggio nodo-pannello



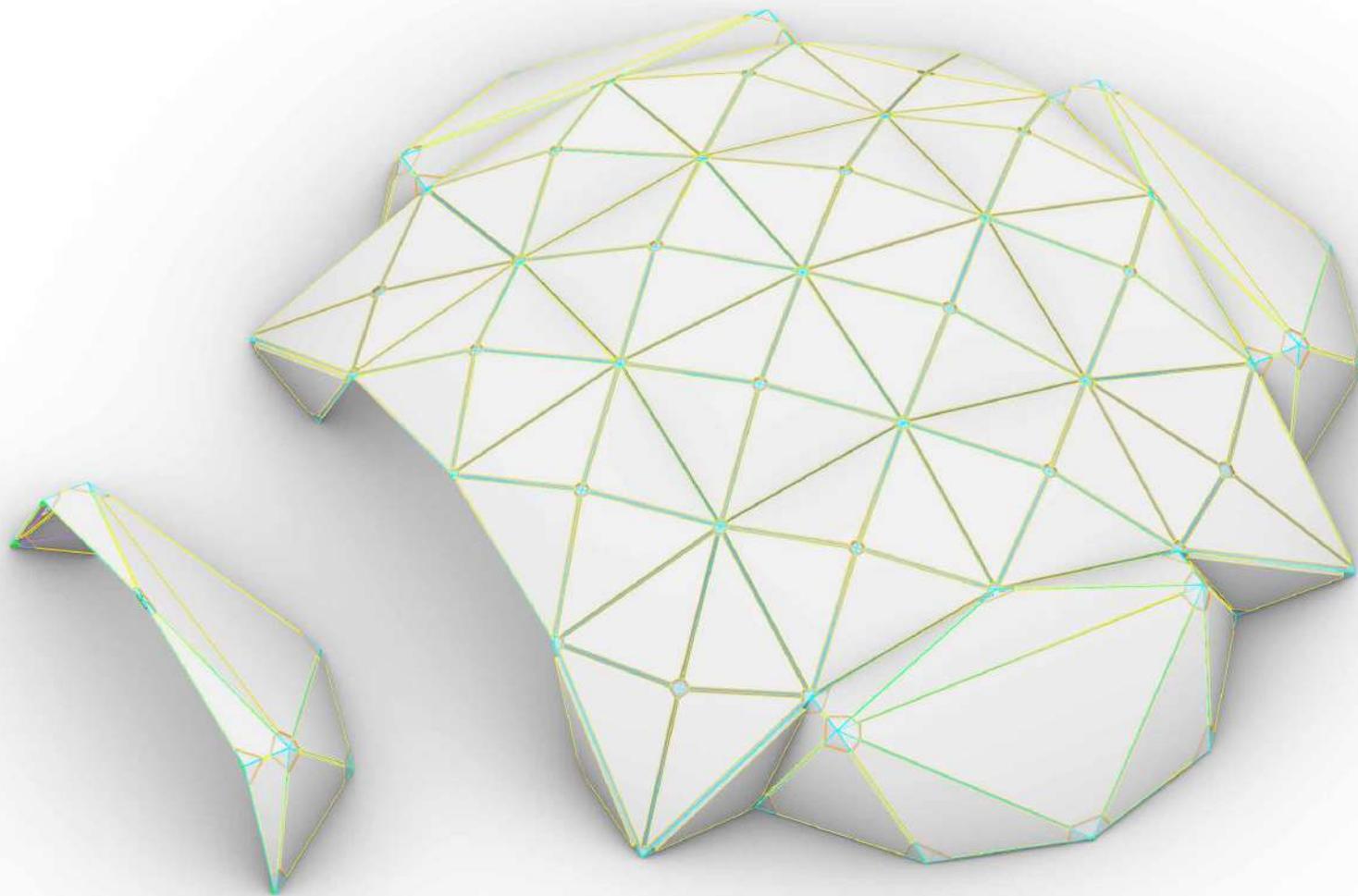
Dettaglio nodo N4



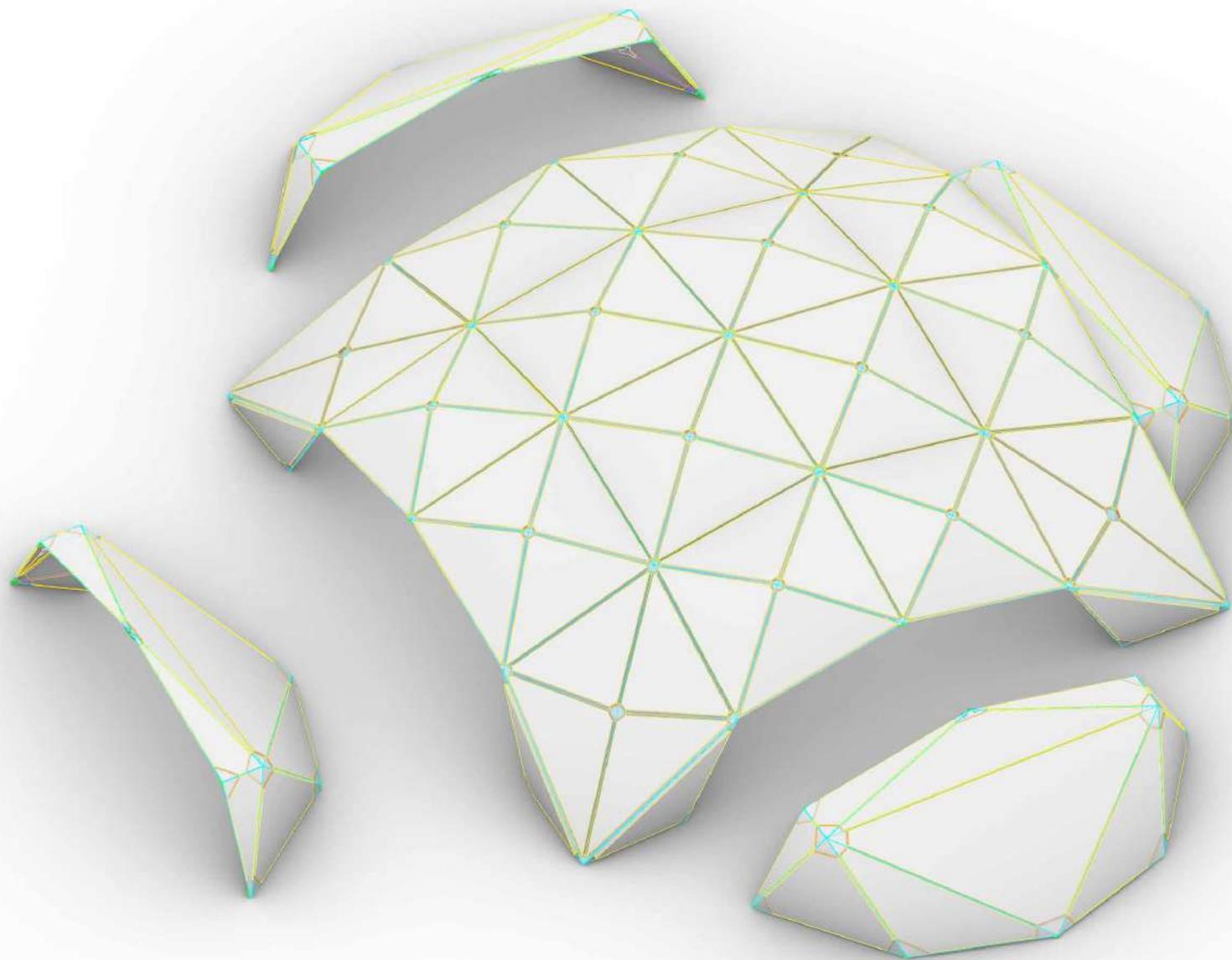
Dettaglio Appoggio



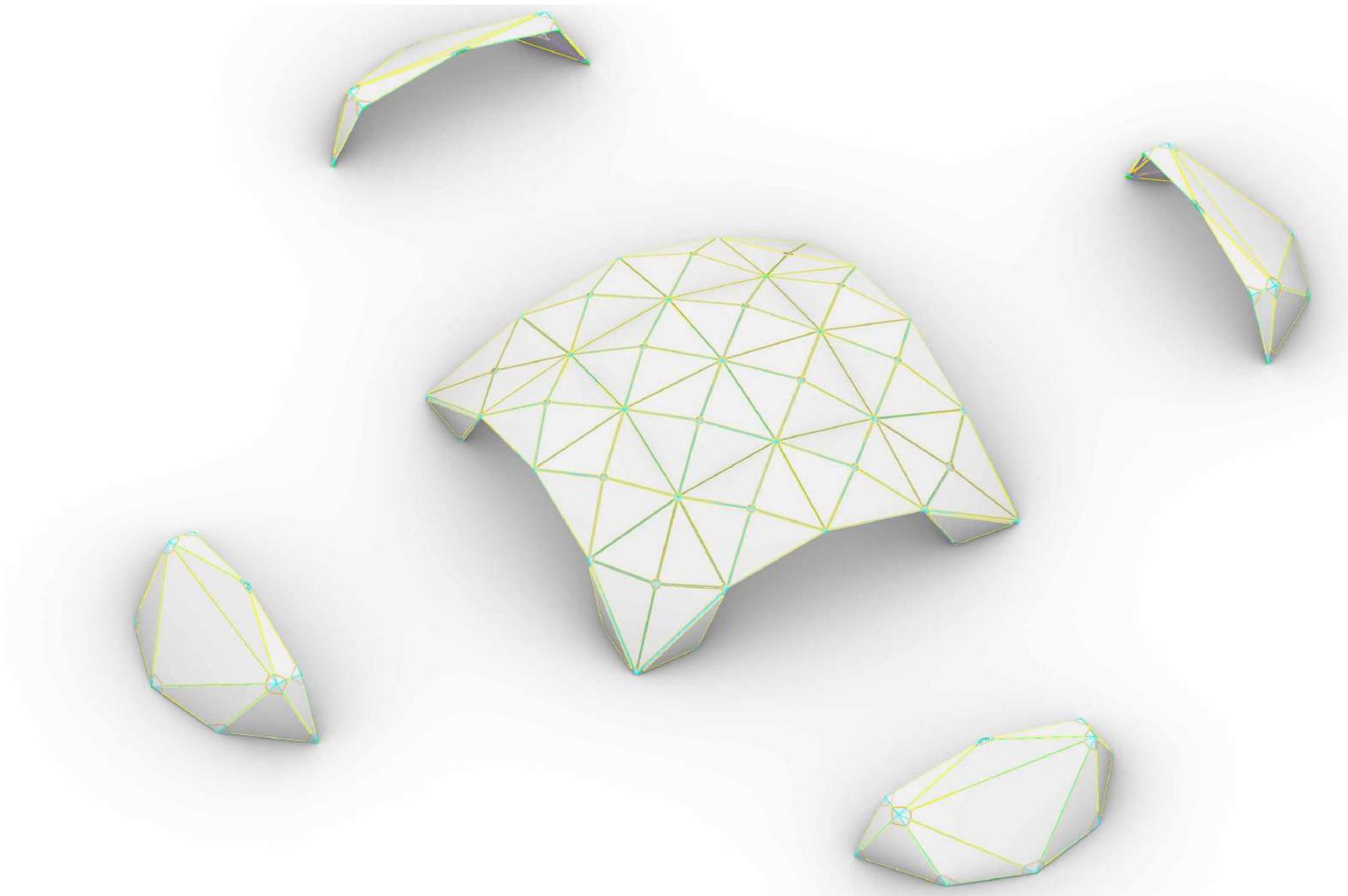
Configurazione per sala da concerti



Configurazione per cinema all'aperto



Configurazione per eventi sportivi e workshop





10- OTTIMIZZAZIONE STRUTTURALE

Struttura reale e modello

“La mappa non è il territorio.” [Alfred Korzybski]

Il modello strutturale è una rappresentazione della realtà, viene quindi scelto in base ai comportamenti che si vogliono descrivere; si può adottare un determinato modello per condurre le indagini sul comportamento lineare reversibile di una struttura, quindi il suo comportamento in stato di esercizio, o si può analizzare il suo comportamento in fase di collasso, o agli stati limite ultimi, dove si indagherà sui comportamenti estremi del materiale e della struttura.

Il processo di modellazione è quindi quell'insieme di teorie, decisioni e aspetti operativi che permettono di estrarre dalla realtà informazioni utili e coerenti riguardo il sistema che si prende in analisi; è implicita in questa operazione una riduzione delle informazioni proprie del sistema reale, riassumendo la realtà, mantenendo però gli aspetti ritenuti utili ai fini dell'indagine ed eliminando quelli che non condizionerebbero in maniera significativa il risultato.

Introducendo un'analogia con la topografia, il modello è come una mappa del territorio, in quanto esso non contiene tutte le caratteristiche ed i particolari del territorio che rappresenta, ma una selezione di questi aspetti, utile a comunicare certe informazioni. È quindi evidente come, così come in topografia esistono innumerevoli mappe relative al medesimo territorio, così per un modello strutturale possono esserci diversi modelli, ognuno contenente diverse informazioni a seconda degli aspetti che se ne vogliono descrivere.

Il processo di modellazione è quindi:

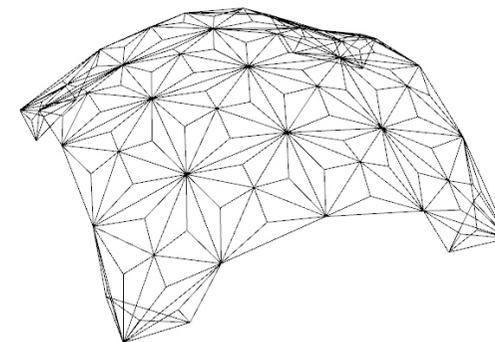
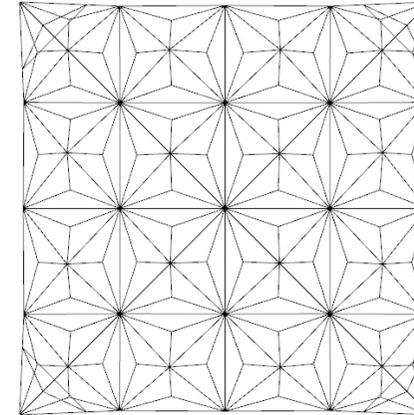
- Un processo decisionale, quindi soggettivo ed inizialmente arbitrario, guidato in misura uguale da conoscenze teoriche ed operative;
- Un processo riduttivo, in quanto la realtà viene semplificata e riassunta attraverso un processo che, in termini matematici, può essere descritto come la proiezione di un oggetto da uno spazio ad un sottospazio;
- Un processo utilitaristico, che trova cioè la sua giustificazione in base ai risultati che si ottengono dall'analisi del modello.

Il modello deve essere quindi costruito seguendo certi principi; le scelte iniziali nella composizione di un modello strutturale vengono condotte su base euristica, cioè in base all'esperienza del modellatore, tramite un processo logico di adduzione, in cui si fondono le esperienze e le conoscenze di chi conduce l'analisi. Queste prime scelte subiscono poi un processo di raffinamento, in cui si controlla l'effettiva adesione del modello alla realtà analizzando l'utilità dei parametri introdotti, testando inoltre la sensibilità del modello. Questa fase di raffinamento deve essere condotta seguendo un principio di sobrietà e parsimonia, ovvero il così detto rasoio di Occam, per cui devono essere eliminati modelli complessi nel momento in cui se ne individui uno più semplice ed elementare che rappresenti comunque in maniera fedele il modello reale.

I risultati dell'analisi sul modello si differenziano in tre famiglie:

- Risultati qualitativi e quantitativi globali:
 - Deformata complessiva (spostamenti globali, rispetto dei vincoli, simmetrie e asimmetrie);
 - Quantità statiche globali (peso proprio, risultanti complessive, reazioni vincolari);
 - Risposta strutturale complessiva come frequenze o curva carico-spostamento, ovvero percorso di equilibrio;
- Risultati qualitativi e quantitativi locali:
 - Sollecitazioni (momenti, azioni assiali o di taglio) e risultanti sezionali;
- Comportamenti e risposte locali:
 - Deformazioni e sforzi;
 - Fessurazioni, danneggiamento;

La struttura definita può essere assimilata ad una struttura reticolare spaziale, dove i listelli che compongono il pannello sono aste che si incontrano nei nodi, che a loro volta vengono definiti come cerniere mutue, sopprimendo così la rigidità alla rotazione dei nodi nel sistema reale, che le renderebbe piuttosto vincoli di semi incastro; questa è una pratica diffusa nella modellazione strutturale in quanto è una condizione che va a vantaggio di sicurezza.



FEA: Analisi ad elementi finiti

L'analisi ad elementi finiti è una tecnica di simulazione digitale, che utilizza il Metodo degli Elementi Finiti (FEM) il cui obiettivo è la risoluzione di una forma discreta ed approssimata di sistemi di equazioni alle derivate parziali (PDE).

I software di analisi agli elementi finiti suddividono il processo di analisi in tre fasi:

- Pre-processing dove viene costruito il modello ad elementi finiti
- Processing di analisi con la risoluzione del problema
- Post-processing dove viene elaborata e rappresentata la soluzione

Nella fase di Pre-processing si definiscono le seguenti caratteristiche dell'analisi:

1. Definizione del tipo di analisi da effettuare (statica/dinamica, lineare/non lineare);
2. Definizione del tipo di elementi finiti (problema piano/spaziale, elemento asta/trave/lastra/piastra/guscio/volume);
3. Definizione dei parametri che descrivono il comportamento costitutivo dei materiali;
4. Definizioni del reticolo dei nodi del problema discreto;
5. Discretizzazione degli elementi finiti a cui si assegnano i nodi a cui essi fanno riferimento;
6. Applicazione delle condizioni al contorno (vincolo e carico).

L'avvio dell'analisi ad elementi finiti fornisce gli output o i risultati del comportamento strutturale statico e dinamico del sistema. I risultati devono quindi essere letti ed interpretati per portare avanti il processo di ottimizzazione strutturale.

In questa tesi il modello strutturale è stato analizzato utilizzando il software di analisi ad elementi finiti Sap2000. Al modello precedentemente definito sono stati quindi assegnati i seguenti parametri.

I parametri

Caratteristiche geometriche ed opzioni di analisi: in primo luogo è stato definito lo spazio digitale, inserendo il modello generato in formato .dxf che riporta le caratteristiche geometriche della struttura, specificando la natura dei nodi che lo compongono (eliminandone quindi i vincoli alla rotazione sui tre assi, Rx, Ry ed Rz), nonché le unità di misura utilizzate per l'analisi (daN, cm).

Il materiale: il materiale di cui sono costituiti i pannelli è il legno di Pioppo (*Populus Linnaeus*) di classe C24. Di seguito la tabella contenuta nella NTC2018. Questi valori sono stati immessi nel modello di calcolo ed assegnati a tutte le aste.

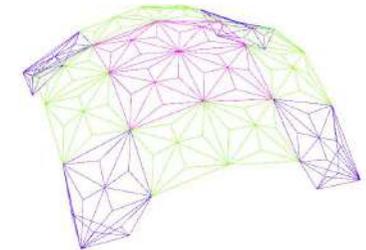
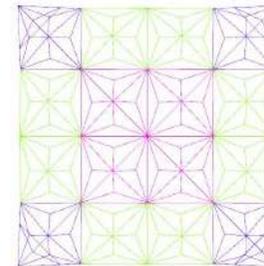
Le sezioni: nella prima fase di analisi sono state ipotizzate sezioni variabili a seconda della quota degli elementi, per questo scopo gli elementi asta sono stati divisi in tre gruppi, rappresentati nell'immagine.

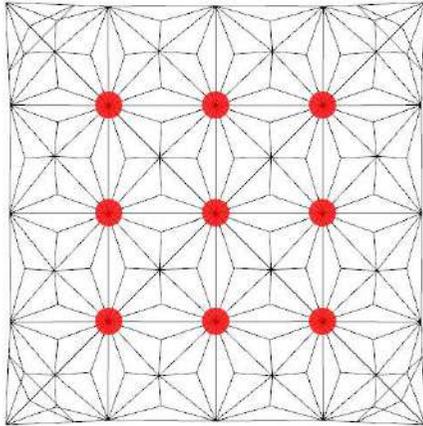
- Gruppo 1 (blu): Sezione in pioppo C24 10x10 cm
- Gruppo 2 (verde): Sezione in pioppo C24 6x6 cm
- Gruppo 3 (magenta): Sezione in pioppo C24 5x5 cm

I vincoli: i vincoli sono stati definiti come cerniere sferiche (traslazioni in direzione x, y e z vincolate, rotazioni libere).

UNI EN 338-2016 (conifere e di pioppo Classe C)		Conifere – Classi "C"										
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C
Resistenze [MPa]		N/mm²										
flexione	$f_{m,k}$	14.00	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	27.00	30.00	35.00	40.00	
trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,k}$	7.20	8.50	10.00	11.50	13.00	14.50	16.50	19.00	22.50	26.00	
trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k}$	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	
compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,k}$	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	24.00	25.00	27.00	
compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,k}$	2.00	2.20	2.20	2.30	2.40	2.50	2.50	2.70	2.70	2.80	
taglio	$f_{v,k}$	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	
Modulo elastico [GPa]		kN/mm²										
modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,mean}$	7.00	8.00	9.00	9.50	10.00	11.00	11.50	12.00	13.00	14.00	
modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,05}$	4.70	5.40	6.00	6.40	6.70	7.40	7.70	8.00	8.70	9.40	
modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,mean}$	0.23	0.27	0.30	0.32	0.33	0.37	0.38	0.40	0.43	0.47	
modulo di taglio medio	G_{mean}	0.44	0.50	0.56	0.59	0.63	0.69	0.72	0.75	0.81	0.88	
Massa volumica [kg/m³]		kg/m³										
massa volumica caratteristica	ρ_k	290.00	310.00	320.00	330.00	340.00	350.00	360.00	380.00	390.00	400.00	
massa volumica media	ρ_m	350.00	370.00	380.00	400.00	410.00	420.00	430.00	460.00	470.00	480.00	

I valori riportati all'interno della UNI EN 338:2016 si riferiscono a legname in equilibrio igrometrico con l'ambiente caratterizzato dal 65% di umidità e 20°C di temperatura (quindi un legno avente circa il 12% di umidità).
I valori a taglio sono desunti da elementi privi di fessurazioni come indicato nella norma UNI EN 408 (a cui quindi deve applicarsi kcr secondo quanto previsto dall'Eurocodice 5).
Un elemento classificato come "C" può indifferentemente lavorare di "cotello" o di "piatto".





I carichi: Per l'analisi dei carichi si è deciso di non considerare il peso proprio della struttura, in quanto costituita in legno e micelio, entrambi materiali estremamente leggeri.

I carichi considerati riguardano quindi il carico di neve, la pressione caratteristica esercitata dal vento ed il carico previsto in fase di manutenzione del manufatto, carichi considerati uniformemente distribuiti che seguendo le indicazioni della NTC 2018 valgono:

$$q_r = 1,5 \text{ kN/m}^2 = 0,015 \text{ daN/cm}^2$$

Questo carico uniformemente distribuito va considerato sull'intera struttura, si moltiplica quindi per la superficie totale:

$$S = 16 \times 16 \text{ m} = 256 \text{ m}^2 = 2560000 \text{ cm}^2$$

$$Q_{tot} = q_r \times S = 0,015 \text{ daN/cm}^2 \times 2560000 \text{ cm}^2 = 38400 \text{ daN}$$

Il carico così calcolato è stato distribuito sui 9 nodi centrali della struttura,

Il carico complessivo è stato quindi suddiviso sui nove nodi in modo da ottenere il carico concentrato.

$$Q_c = Q_{tot} : 9 = 38400 \text{ daN} : 9 = 4266,6 \text{ N} \approx 4300 \text{ daN}$$

Le masse: al fine di condurre l'analisi modale, ovvero determinare comportamento dinamico della struttura quando essa vibra se sottoposta a dinamica autonoma o a sollecitazioni dinamiche esterne, sono stati introdotti parametri di Masse Traslanti applicate ai medesimi nodi.

Le masse traslanti sono state così quantificate:

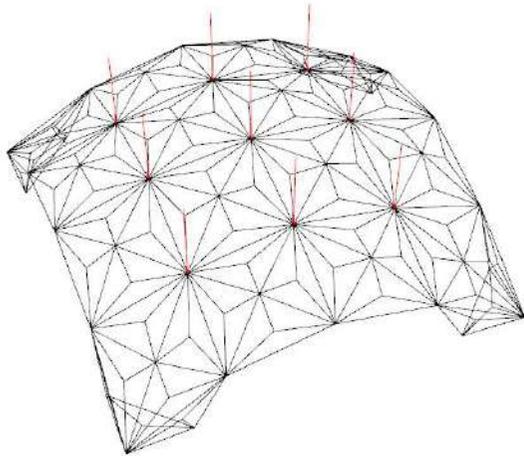
$$M = F : a$$

dove: $M = M_t$ (massa traslante)

$F = Q_c$ (carico concentrato)

$a = g$ (accelerazione di gravità)

$$M_t = Q_c : g = 4300 \text{ daN} : 980,665 \text{ cm/s}^2 = 4,38 \text{ daN s}^2/\text{cm}^2 \approx 4,4 \text{ daN s}^2/\text{cm}^2$$



Strategie di ottimizzazione strutturale

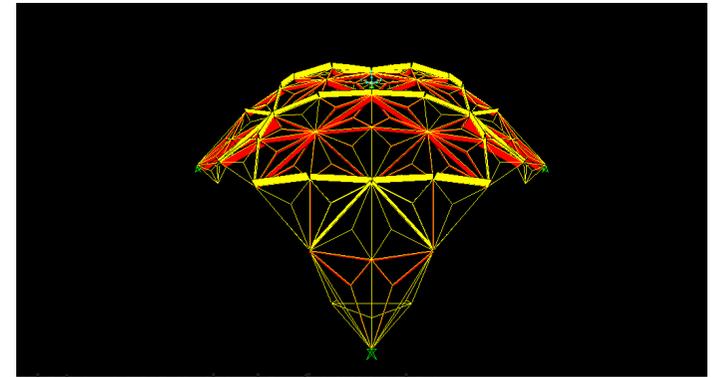
Il processo di analisi strutturale mediante l'analisi ad elementi finiti definisce quindi le sollecitazioni assiali nelle aste. Bisogna specificare che il processo di analisi strutturale e verifica tensionale è un processo iterativo, si compone quindi del momento di analisi delle sollecitazioni e di verifica tensionale delle sezioni più sollecitate e, in caso di verifiche non soddisfatte, ripetizione del processo modificando determinate caratteristiche del modello.

In fase preliminare sono state definite a priori delle strategie da attuare nel caso la verifica tensionale delle sezioni non fosse soddisfatta:

- Aumento della sezione resistente;
- Cambio della classe del materiale caratterizzata da prestazioni di resistenza e duttilità migliori;
- Irrigidimento dei listelli (con medesimo materiale o materiale diverso);
- Introdurre nel calcolo il pannello, considerandolo collaborante;
- Prevedere dei controventi che irrigidiscano la struttura.

Verifiche tensionali: prima iterazione

L'analisi ad elementi finiti fornisce in output le sollecitazioni a cui sono soggette le aste



La verifica tensionale viene condotta equiparando le tensioni interne calcolate usando la formula:

$$\sigma = F/A \quad \text{dove } \sigma = \text{tensione normale nell'asta}$$

$$F = \text{sollecitazione nell'asta}$$

$$A = \text{area della sezione}$$

Ai valori caratteristici del materiale definiti dalla NTC2018:

$$\sigma_c = 21,00 \text{ N/mm}^2 = 210 \text{ daN/cm}^2 \quad \text{massima tensione ammissibile per elemento compresso (puntone)}$$

$$\sigma_t = 14,50 \text{ N/mm}^2 = 145 \text{ daN/cm}^2 \quad \text{massima tensione ammissibile per elemento teso (tirante)}$$

Opportunamente abbattuti dividendoli per un coefficiente di sicurezza γ :

$$\gamma = 1,5$$

$$\sigma_{camm} = 210 \text{ daN/cm}^2 : 1,5 = 140 \text{ daN/cm}^2$$

$$\sigma_{tamm} = 145 \text{ daN/cm}^2 : 1,5 = 96,7 \text{ daN/cm}^2$$

•	Iterazione 1			
o	Sezione 1 : 10x10 cm	A1= 100 cm ²		
	Ncmax= 14065 daN	$\sigma_c = N_c : A_1 = 14065 \text{ daN} : 100 \text{ cm}^2 = 140,65 \text{ daN/cm}^2$	> σ_{camm}	<u>NON VERIFICATA</u>
	Ntmax= 787 daN	$\sigma_t = N_t : A_1 = 787 \text{ daN} : 100 \text{ cm}^2 = 7,87 \text{ daN/cm}^2$	< σ_{tamm}	<u>VERIFICATA</u>
o	Sezione 2 : 6x6 cm	A2= 36 cm ²		
	Ncmax= 7370 daN	$\sigma_c = N_c : A_1 = 7370 \text{ daN} : 36 \text{ cm}^2 = 204,7 \text{ daN/cm}^2$	> σ_{camm}	<u>NON VERIFICATA</u>
	Ntmax= 7426 daN	$\sigma_t = N_t : A_1 = 7426 \text{ daN} : 36 \text{ cm}^2 = 206,3 \text{ daN/cm}^2$	> σ_{tamm}	<u>NON VERIFICATA</u>
o	Sezione 3 : 5x5 cm	A3= 25 cm ²		
	Ncmax= 6553,4 daN	$\sigma_c = N_c : A_1 = 6553,4 \text{ daN} : 25 \text{ cm}^2 = 262,1 \text{ daN/cm}^2$	> σ_{camm}	<u>NON VERIFICATA</u>
	Ntmax= 6143,1 daN	$\sigma_t = N_t : A_1 = 6143,1 \text{ daN} : 25 \text{ cm}^2 = 206,3 \text{ daN/cm}^2$	> σ_{tamm}	<u>NON VERIFICATA</u>

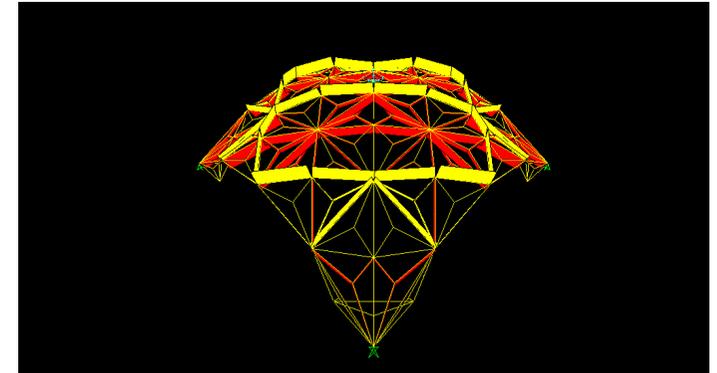
Verifiche tensionali: terza iterazione

Si è deciso quindi di aumentare le sezioni resistenti, ripetendo l'analisi strutturale e le verifiche tensionali. Di seguito le verifiche tensionali della terza iterazione.

Sezione 1.3 = 12x12 cm

Sezione 2.3 = 10x10 cm

Sezione 3.3 = 10x10 cm



La verifica tensionale viene condotta equiparando le tensioni interne calcolate usando la formula:

$$\sigma = F/A \quad \text{dove } \sigma = \text{tensione normale nell'asta}$$
$$F = \text{sollecitazione nell'asta}$$
$$A = \text{area della sezione}$$

Ai valori caratteristici del materiale definiti dalla NTC2018:

$\sigma_c = 21,00 \text{ N/mm}^2 = 210 \text{ daN/cm}^2$ massima tensione ammissibile per elemento compresso (puntone)

$\sigma_t = 14,50 \text{ N/mm}^2 = 145 \text{ daN/cm}^2$ massima tensione ammissibile per elemento teso (tirante)

Opportunamente abbattuti dividendoli per un coefficiente di sicurezza γ :

$\gamma = 1,5$

$\sigma_{camm} = 210 \text{ daN/cm}^2 : 1,5 = 140 \text{ daN/cm}^2$

$\sigma_{tamm} = 145 \text{ daN/cm}^2 : 1,5 = 96,7 \text{ daN/cm}^2$

- Iterazione 3

- o Sezione 1 : 12x12 cm $A_1 = 144 \text{ cm}^2$

$N_{cmax} = 9819 \text{ daN}$ $\sigma_c = N_c : A_1 = 9819 \text{ daN} : 144 \text{ cm}^2 = 68,2 \text{ daN/cm}^2$ $< \sigma_{camm}$ VERIFICATA

$N_{tmax} = 172 \text{ daN}$ $\sigma_t = N_t : A_1 = 172 \text{ daN} : 144 \text{ cm}^2 = 1,2 \text{ daN/cm}^2$ $< \sigma_{tamm}$ VERIFICATA

- o Sezione 2 : 10x10 cm $A_2 = 100 \text{ cm}^2$

$N_{cmax} = 9177 \text{ daN}$ $\sigma_c = N_c : A_1 = 9177 \text{ daN} : 100 \text{ cm}^2 = 91,8 \text{ daN/cm}^2$ $< \sigma_{camm}$ VERIFICATA

$N_{tmax} = 9470 \text{ daN}$ $\sigma_t = N_t : A_1 = 9470 \text{ daN} : 100 \text{ cm}^2 = 94,7 \text{ daN/cm}^2$ $< \sigma_{tamm}$ VERIFICATA

- o Sezione 3 : 10x10 cm $A_3 = 100 \text{ cm}^2$

$N_{cmax} = 6840 \text{ daN}$ $\sigma_c = N_c : A_1 = 6840 \text{ daN} : 100 \text{ cm}^2 = 68,4 \text{ daN/cm}^2$ $< \sigma_{camm}$ VERIFICATA

$N_{tmax} = 8479 \text{ daN}$ $\sigma_t = N_t : A_1 = 8479 \text{ daN} : 100 \text{ cm}^2 = 84,8 \text{ daN/cm}^2$ $< \sigma_{tamm}$ VERIFICATA

Una seconda strategia: irrigidimento con EXTREN®

EXTREN® è il marchio registrato di una linea di prodotti sviluppati dalla Strongwell Corporation, di profili e piastre in fibra di vetro saturati di resina polimerica ed estrusi attraverso matrici riscaldate, per formare sezioni strutturali costanti.

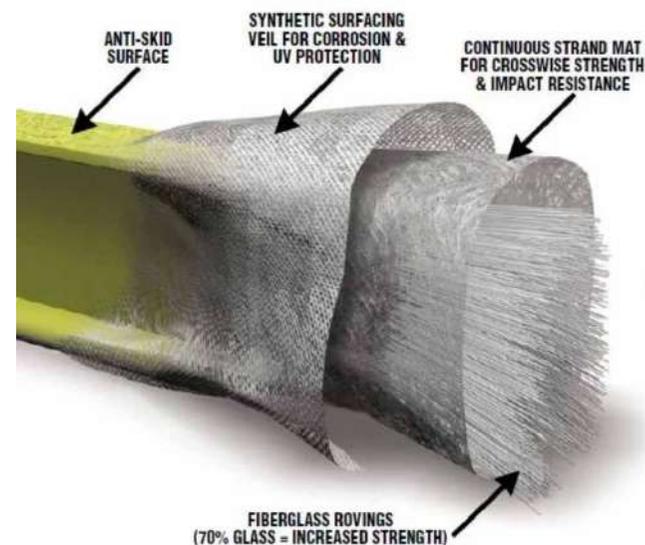
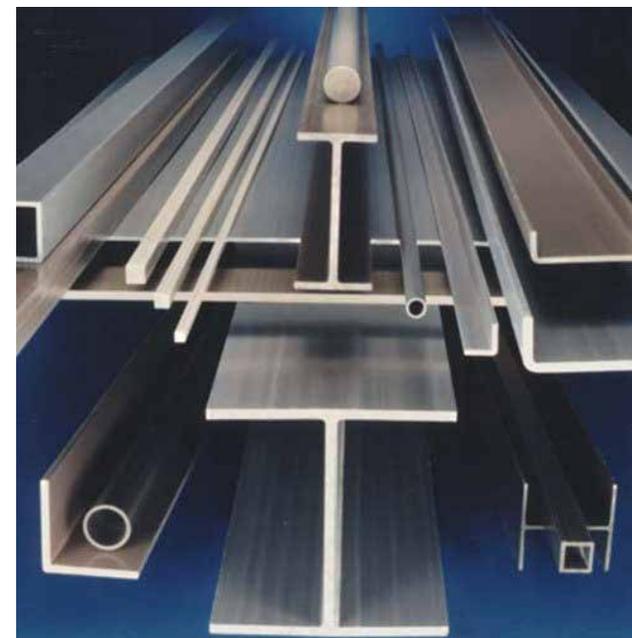
I profili sono costituiti da due tipi di rinforzi:

- Corde longitudinali, che assicurano la resistenza del profilo in direzione longitudinale, ogni fibra contiene dagli 800 ai 4000 filamenti;
- Rete in fibra continua, che assicura resistenza multidirezionale al profilo, costituita da lunghe fibre di vetro intrecciate e tenute assieme da una piccola quantità di resina, detta legante;
- Rinforzi multiassiali, tessuti ingegnerizzati ad alte prestazioni costituiti da fibre monodirezionali orientate in una o più direzioni;
- Ulteriori rinforzi che possono essere usati in base alle necessità prestazionali.

Le resine utilizzate come leganti sono di vario tipo:

- Poliestere: per prestazioni ordinarie, con ottima resistenza alla corrosione;
- Vinilestere: resina nobile con alte prestazioni strutturali, maggiore resistenza alle alte temperature e migliore resistenza alla corrosione.

Inoltre, tutti i profili EXTREN® hanno un velo superficiale di tessuto non tessuto in poliestere che racchiude l'intero profilo; questo tessuto saturo di resina assicura protezione contro le radiazioni UV e contro gli agenti corrosivi, impedisce inoltre alle fibre interne di affiorare in superficie.



Le principali caratteristiche dei profili EXTREN® sono le seguenti:

- Alta resistenza meccanica: più resistente dell'acciaio strutturale a parità di peso;
- Basso peso specifico: pari al 20% dell'acciaio strutturale ed al 70% dell'alluminio, rendendolo facilmente trasportabile e manovrabile;
- Alta resistenza alla corrosione: inattaccabile dalle muffe e resistente ad un'ampia varietà di ambienti corrosivi;
- Bassa conduttività sia elettrica che termica;
- Elettromagneticamente trasparente: viene attraversato da onde radio, microonde e altre frequenze elettromagnetiche;
- Dimensionalmente stabile: il coefficiente di dilatazione termica dei profili è minore di quello dell'acciaio e dell'alluminio.

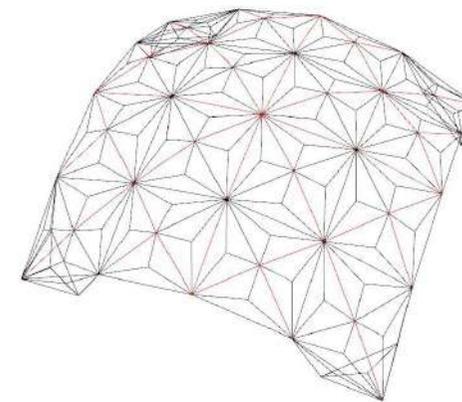
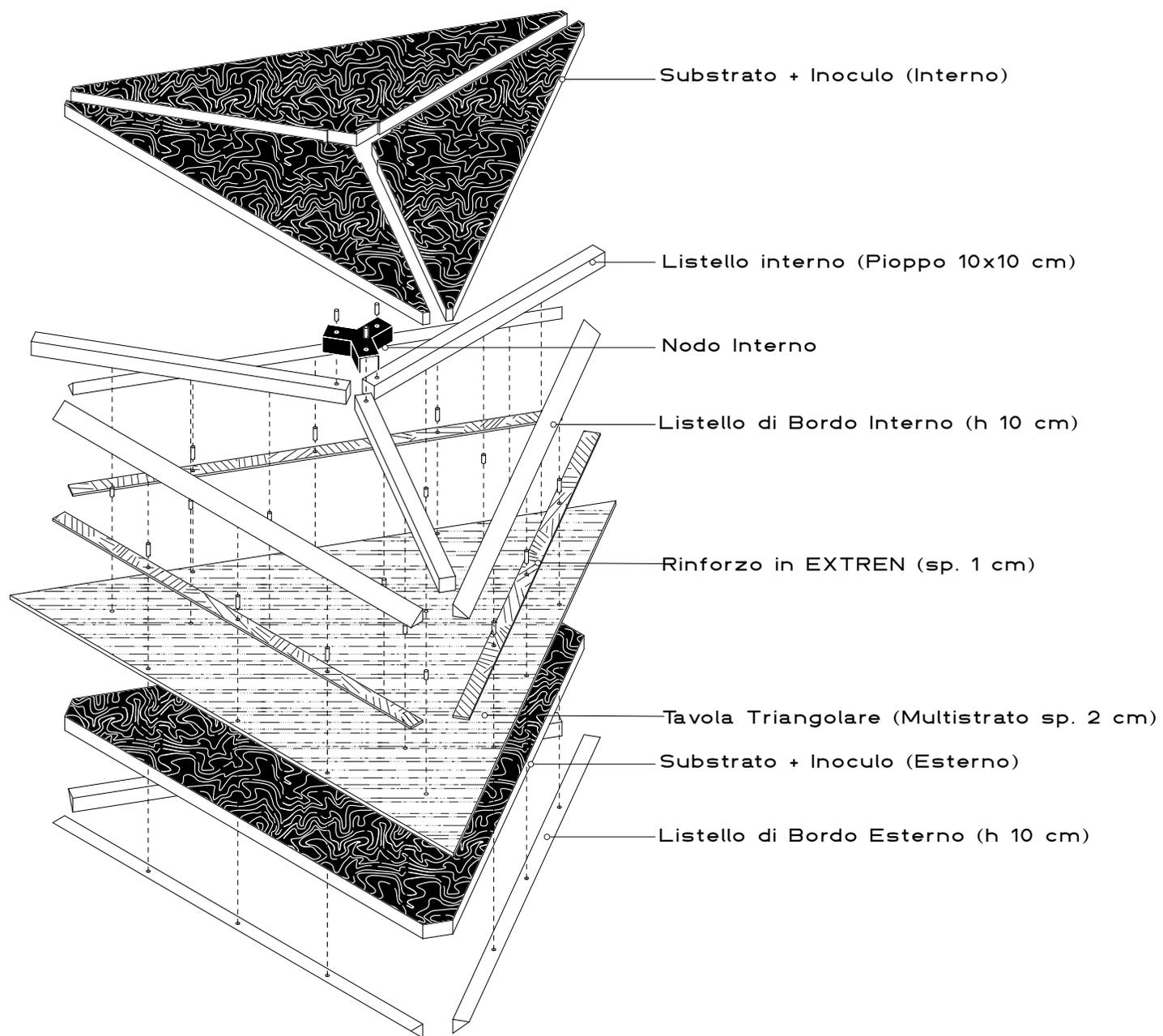
Per questa tesi, date le condizioni ambientali a cui i pannelli saranno esposti, si è deciso di selezionare la serie EXTREN® 625, in vinilestere, altamente resistente al fuoco, resistente ai raggi ultravioletti, consigliata per ambienti altamente corrosivi ed applicazioni in ambienti ad alte temperature.

I profili EXTREN® possono essere tagliati con troncatrice, forati con trapano e levigati come se fossero legno, ma data la grande capacità abrasiva della fibra di vetro, vanno usate lame, punte e tazze diamantate o trattate al carburo.

L'uso di questo materiale nelle sezioni più sollecitate ci permette di verificare gli stati tensionali della struttura, mantenendo comunque la biodegradabilità dei pannelli, in quanto una volta compostati i profili EXTREN® potranno essere recuperati e riutilizzati, o altrimenti smontati prima della fase di compostaggio.

PROPERTIES	ASTM TEST METHOD	UNITS/VALUE	SERIES 500/525 SHAPES	SERIES 600/625 SHAPES	SERIES 500/525 PLATE Ⓞ			SERIES 600/625 PLATE Ⓞ		
					1/8"	3/16"-3/8"	1/2"-1"	1/8"	3/16"-1/4"	3/8"-1"
					3.175 mm	4.76-6.35 mm	9.5-25.4 mm	3.175 mm	4.76-6.35 mm	9.5-25.4 mm
MECHANICAL										
Tensile Stress, LW	D638	psi N/mm ²	30,000 207	30,000 207	20,000 138	20,000 138	20,000 138	20,000 138	20,000 138	20,000 138
Tensile Stress, CW	D638	psi N/mm ²	7,000 48.3	7,000 48.3	7,500 51.7	10,000 68.9	10,000 68.9	10,000 68.9	7,500 51.7	10,000 68.9
Tensile Modulus, LW	D638	10 ³ psi 10 ³ N/mm ²	2.5 17.2	2.6 17.9	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4
Tensile Modulus, CW	D638	10 ³ psi 10 ³ N/mm ²	0.8 5.52	0.8 5.52	0.7 4.83	0.9 6.21	1.0 6.89	1.0 6.89	1.0 6.89	1.0 6.89
Compressive Stress, LW	D695	psi N/mm ²	30,000 207	30,000 207	24,000 165	24,000 165	24,000 165	24,000 165	24,000 165	24,000 165
Compressive Stress, CW	D695	psi N/mm ²	15,000 103	16,000 110	15,500 107	16,500 114	20,000 138	16,500 114	17,500 121	17,500 121
Compressive Modulus, LW	D695	10 ³ psi 10 ³ N/mm ²	2.5 17.2	2.6 17.9	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4
Compressive Modulus, CW	D695	10 ³ psi 10 ³ N/mm ²	0.8 5.52	0.8 5.52	0.7 4.83	0.9 6.21	1.0 6.89	1.0 6.89	1.0 6.89	1.0 6.89
Flexural Stress, LW	D790	psi N/mm ²	30,000 207	30,000 207	24,000 165	24,000 165	24,000 165	24,000 165	24,000 165	24,000 165
Flexural Stress, CW	D790	psi N/mm ²	10,000 68.9	10,000 68.9	10,000 68.9	13,000 89.6	17,000 117	10,000 68.9	13,000 89.6	17,000 117
Flexural Modulus, LW	D790	10 ³ psi 10 ³ N/mm ²	1.6 11.0	1.6 11.0	1.1 7.58	1.1 7.58	1.4 9.65	1.1 7.58	1.1 7.58	1.1 7.58
Flexural Modulus, CW	D790	10 ³ psi 10 ³ N/mm ²	0.8 5.52	0.8 5.52	0.8 5.51	0.8 5.51	1.3 8.96	0.8 5.51	0.9 6.21	1.3 8.96
Modulus of ElasticityⓄ	full section	10 ³ psi 10 ³ N/mm ²	2.6 17.9	2.8 19.3	LW: 2.0 CW: 5.51	2.0 5.51	2.0 5.51	2.0 5.51	2.0 5.51	2.0 6.21
Modulus of Elasticity >4" Ⓞ >102 mm	full section	10 ³ psi 10 ³ N/mm ²	2.5 17.2	2.5 17.2	-	-	-	-	-	-
Shear Modulus, LW ⓄⓄ	D5379	10 ³ psi 10 ³ N/mm ²	0.425 2.93	0.425 2.93	-	-	-	-	-	-
Short Beam Shear, LW ⓄⓄ	D2344	psi N/mm ²	4,500 31.0	4,500 31.0	-	-	-	-	-	-
Ultimate Bearing Stress, LW	D953	psi N/mm ²	30,000 207	30,000 207	32,000 221	32,000 221	32,000 221	32,000 221	32,000 221	32,000 221
Poisson's Ratio, LW Ⓞ	D3039	in/in mm/mm	0.33 0.33	0.33 0.33	0.31 0.31	0.31 0.31	0.31 0.31	0.32 0.32	0.32 0.32	0.32 0.32
Notched Izod Impact, LW	D256	ft-lbs/in J/mm	25 1.33	25 1.33	15 0.801	10 0.533	10 0.533	15 0.801	10 0.533	10 0.533
Notched Izod Impact, CW	D256	ft-lbs/in J/mm	4 0.214	4 0.214	5 0.267	5 0.267	5 0.267	5 0.267	5 0.267	5 0.267

Il pannello irrigidito con profili EXTREN®



In rosso i listelli rinforzati con **extren®**

Analisi tensionale con EXTREN®: prima iterazione

È stata quindi condotta la seconda fase di analisi, assimilando le sezioni rinforzate ad una sezione di legno di pioppo C24 moltiplicata un coefficiente di omogeneizzazione n pari al rapporto dei moduli elastici dei due materiali.

$n = E_e : E_p$ Dove n = coefficiente di omogeneizzazione
 E_e = modulo elastico del profilo in EXTREN®
 E_p = modulo elastico del listello di legno

$E_e = 13700 \text{ N/mm}^2 = 137000 \text{ daN/cm}^2$

$E_p = 11 \text{ kN/mm}^2 = 11000 \text{ N/mm}^2 = 110000 \text{ daN/cm}^2$

$n = 137000 \text{ daN/cm}^2 : 110000 \text{ daN/cm}^2 = 1,24$

La verifica tensionale viene condotta equiparando le tensioni interne calcolate usando la formula:

$\sigma = F/A$ dove σ = tensione normale nell'asta

F = sollecitazione nell'asta

A = area della sezione

Ai valori caratteristici del materiale definiti dalla NTC2018:

$\sigma_c = 21,00 \text{ N/mm}^2 = 210 \text{ daN/cm}^2$ massima tensione ammissibile per elemento compresso (puntone)

$\sigma_t = 14,50 \text{ N/mm}^2 = 145 \text{ daN/cm}^2$ massima tensione ammissibile per elemento teso (tirante)

Opportunamente abbattuti dividendoli per un coefficiente di sicurezza γ :

$\gamma = 1,5$

$\sigma_{camm} = 210 \text{ daN/cm}^2 : 1,5 = 140 \text{ daN/cm}^2$

$\sigma_{tamm} = 145 \text{ daN/cm}^2 : 1,5 = 96,7 \text{ daN/cm}^2$

Si è intrapresa quindi la seconda serie di iterazioni eseguite sul nuovo modello

• Iterazione 2.1

o Sezione 1 : 10x10 cm $A_1 = 100 \text{ cm}^2$ $A_{1r} = A_1 \times n = 100 \text{ cm}^2 \times 1,24 = 124 \text{ cm}^2$

$N_{cmax} = 14098 \text{ daN}$ $\sigma_c = N_c : A_{1r} = 14098 \text{ daN} : 124 \text{ cm}^2 = 113,7 \text{ daN/cm}^2 < \sigma_{camm}$

$N_{tmax} = 1332 \text{ daN}$ $\sigma_t = N_t : A_1 = 1332 \text{ daN} : 100 \text{ cm}^2 = 13,32 \text{ daN/cm}^2 < \sigma_{tamm}$

VERIFICATA

VERIFICATA

o Sezione 2 : 6x6 cm $A_2 = 36 \text{ cm}^2$ $A_{2r} = A_2 \times n = 36 \text{ cm}^2 \times 1,24 = 44,6 \text{ cm}^2$

$N_{cmax} = 7428 \text{ daN}$ $\sigma_c = N_c : A_{2r} = 7428 \text{ daN} : 44,6 \text{ cm}^2 = 166,4 \text{ daN/cm}^2 < \sigma_{camm}$

$N_{tmax} = 7396 \text{ daN}$ $\sigma_t = N_t : A_{2r} = 7396 \text{ daN} : 44,6 \text{ cm}^2 = 165,7 \text{ daN/cm}^2 > \sigma_{tamm}$

VERIFICATA

NON VERIFICATA

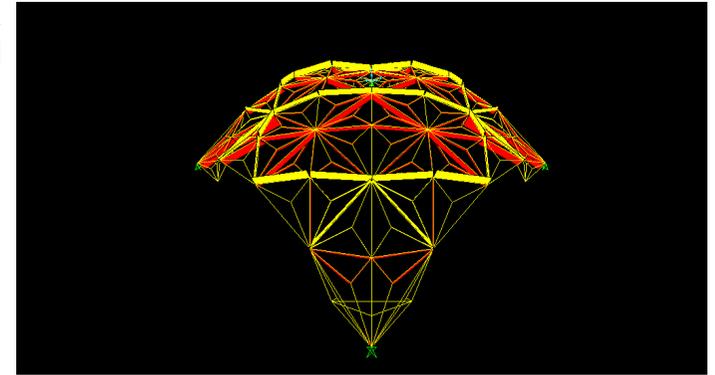
o Sezione 3 : 5x5 cm $A_3 = 25 \text{ cm}^2$ $A_{3r} = A_3 \times n = 25 \text{ cm}^2 \times 1,24 = 31 \text{ cm}^2$

$N_{cmax} = 7008 \text{ daN}$ $\sigma_c = N_c : A_1 = 7008 \text{ daN} : 31 \text{ cm}^2 = 226 \text{ daN/cm}^2 > \sigma_{camm}$

$N_{tmax} = 5912 \text{ daN}$ $\sigma_t = N_t : A_1 = 5912 \text{ daN} : 31 \text{ cm}^2 = 190,7 \text{ daN/cm}^2 > \sigma_{tamm}$

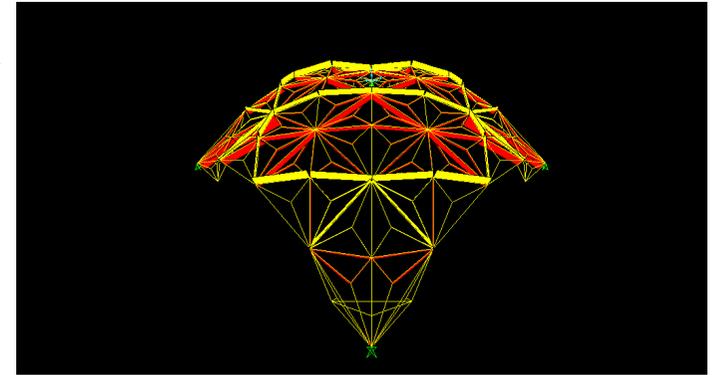
NON VERIFICATA

NON VERIFICATA



Analisi tensionale con EXTREN®: terza iterazione

Si è deciso quindi di aumentare le sezioni resistenti, uniformandole ad una unica sezione, ripetendo l'analisi strutturale e le verifiche tensionali. Di seguito le verifiche tensionali della terza iterazione.



La verifica tensionale viene condotta equiparando le tensioni interne calcolate usando la formula:

$$\sigma = F/A \quad \text{dove } \sigma = \text{tensione normale nell'asta}$$
$$F = \text{sollecitazione nell'asta}$$
$$A = \text{area della sezione}$$

Ai valori caratteristici del materiale definiti dalla NTC2018:

$$\sigma_c = 21,00 \text{ N/mm}^2 = 210 \text{ daN/cm}^2 \quad \text{massima tensione ammissibile per elemento compresso (puntone)}$$

$$\sigma_t = 14,50 \text{ N/mm}^2 = 145 \text{ daN/cm}^2 \quad \text{massima tensione ammissibile per elemento teso (tirante)}$$

Opportunamente abbattuti dividendoli per un coefficiente di sicurezza γ :

$$\gamma = 1,5$$

$$\sigma_{camm} = 210 \text{ daN/cm}^2 : 1,5 = 140 \text{ daN/cm}^2$$

$$\sigma_{tamm} = 145 \text{ daN/cm}^2 : 1,5 = 96,7 \text{ daN/cm}^2$$

Si è intrapresa quindi la seconda serie di iterazioni eseguite sul nuovo modello

- Iterazione 2.3

- o Sezione 1 : 10x10 cm $A_1 = 100 \text{ cm}^2$ $A_{1r} = A_1 \times n = 100 \text{ cm}^2 \times 1,24 = 124 \text{ cm}^2$

$$N_{cmax} = 10990 \text{ daN} \quad \sigma_c = N_c : A_{1r} = 10990 \text{ daN} : 124 \text{ cm}^2 = 88,6 \text{ daN/cm}^2 < \sigma_{camm} \quad \underline{\underline{VERIFICATA}}$$

$$N_{tmax} = 11330 \text{ daN} \quad \sigma_t = N_t : A_1 = 11330 \text{ daN} : 124 \text{ cm}^2 = 91,4 \text{ daN/cm}^2 < \sigma_{tamm} \quad \underline{\underline{VERIFICATA}}$$

L'analisi Modale

L'analisi modale è lo studio del comportamento dinamico di una struttura quando questa viene sottoposta a vibrazione. In analisi strutturale, permette la determinazione delle proprietà e della risposta di una struttura, vincolata o libera, in dinamica autonoma oppure eccitata da sollecitazioni forzanti dinamiche imposte dall'esterno; tutte le strutture presentano un comportamento modale, che dipende da come sono realizzate, in particolare dipende dalla distribuzione di massa e di rigidezza della struttura.

L'analisi modale si basa sul presupposto che il comportamento di una struttura complessa costituita da un numero consistente di gradi di libertà (come ad esempio un modello ad elementi finiti dettagliato) possa essere rappresentato adeguatamente attraverso una combinazione lineare di sistemi a un singolo grado di libertà.

La modellazione ad elementi finiti permette di determinare con un ottimo livello di accuratezza il comportamento dinamico del sistema costituito. È per questo motivo che nella definizione del modello abbiamo introdotto le masse traslanti, applicate nei nove nodi centrali. Queste masse sono necessarie per condurre l'analisi modale in quanto sono queste che definiscono i modi di vibrare della struttura. Il software utilizzato per l'analisi statica permette di condurre l'analisi modale, dando come output i periodi T e le frequenze f che definiscono i modi di vibrare della struttura. Il software indaga di default su dodici modi di vibrare della struttura analizzata, di cui verranno indicati i primi tre.

L'analisi modale viene qui condotta come fase iniziale dell'analisi sismica, in una fase di analisi successiva i periodi T che risultano dall'analisi modale verranno confrontati all'accelerazione del terreno, espressa come rapporto tra accelerazione in direzione x e y e l'accelerazione di gravità. Da questo ne deriverà uno spettro di risposta della struttura ad un evento sismico con una data probabilità di accadimento, definito dalle NTC 2018.

L'analisi modale genera quindi un numero n di modi di vibrare propri della struttura, in fase di analisi sismica viene generato un ulteriore modo di vibrare che rappresenta la combinazione lineare dei modi precedenti in base all'azione sismica, da cui ne derivano gli spostamenti sismici e di conseguenza le sollecitazioni.

È utile specificare che la struttura analizzata rispetta in buona parte dei criteri di regolarità definiti dalle NTC 2018 nel capitolo relativo alla progettazione in zona sismica. In particolare la struttura:

- la distribuzione di masse e rigidezze è approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali e la forma in pianta è compatta, ossia il contorno di ogni orizzontamento è convesso;
- il rapporto tra i lati del rettangolo circoscritto alla pianta di ogni orizzontamento è inferiore a 4;
- massa e rigidezza rimangono costanti o variano gradualmente, senza bruschi cambiamenti, dalla base alla sommità della costruzione;
- eventuali restringimenti della sezione orizzontale della costruzione avvengono con continuità da un orizzontamento al successivo;

In particolare, la simmetria in pianta della struttura rende l'azione sismica ondulatoria nella direzione x e nella direzione y uguale, trascurando come è pratica comune l'azione sismica sussultoria, ovvero quella nella direzione z .

Di seguito verranno indicati i periodi e le frequenze dei primi tre modi di vibrare delle due strutture ipotizzate, quella in soli listelli di legno e quella che prevede gli irrigidimenti in EXTREN®.

Modi di vibrare: frequenze e periodi

STRUTTURA IN LISTELLI DI LEGNO

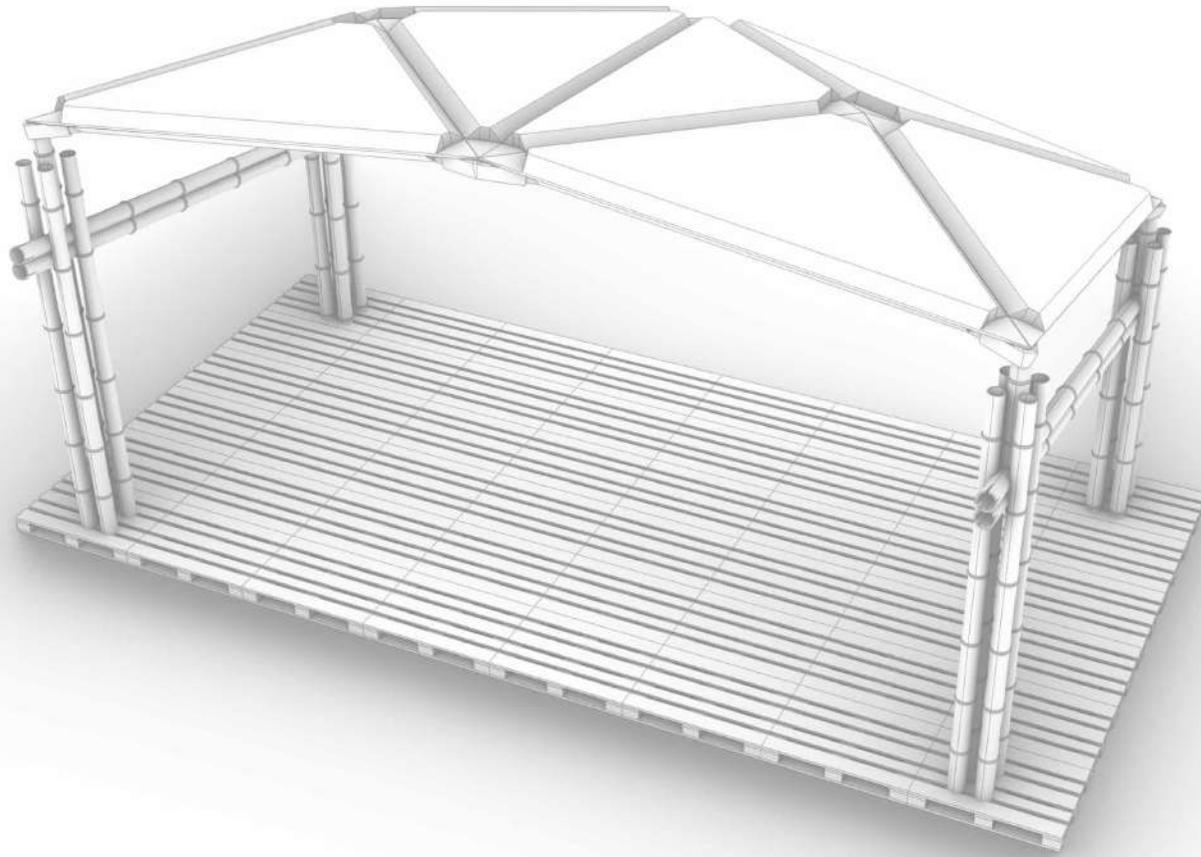
- Modo di vibrare 1: $T = 2,99 \text{ s}$
 $f = 0,33 \text{ Hz}$
- Modo di vibrare 2: $T = 2,72 \text{ s}$
 $f = 0,36 \text{ Hz}$
- Modo di vibrare 3: $T = 1,66 \text{ s}$
 $f = 0,60 \text{ Hz}$

STRUTTURA IN LISTELLI DI LEGNO ED EXTREN®

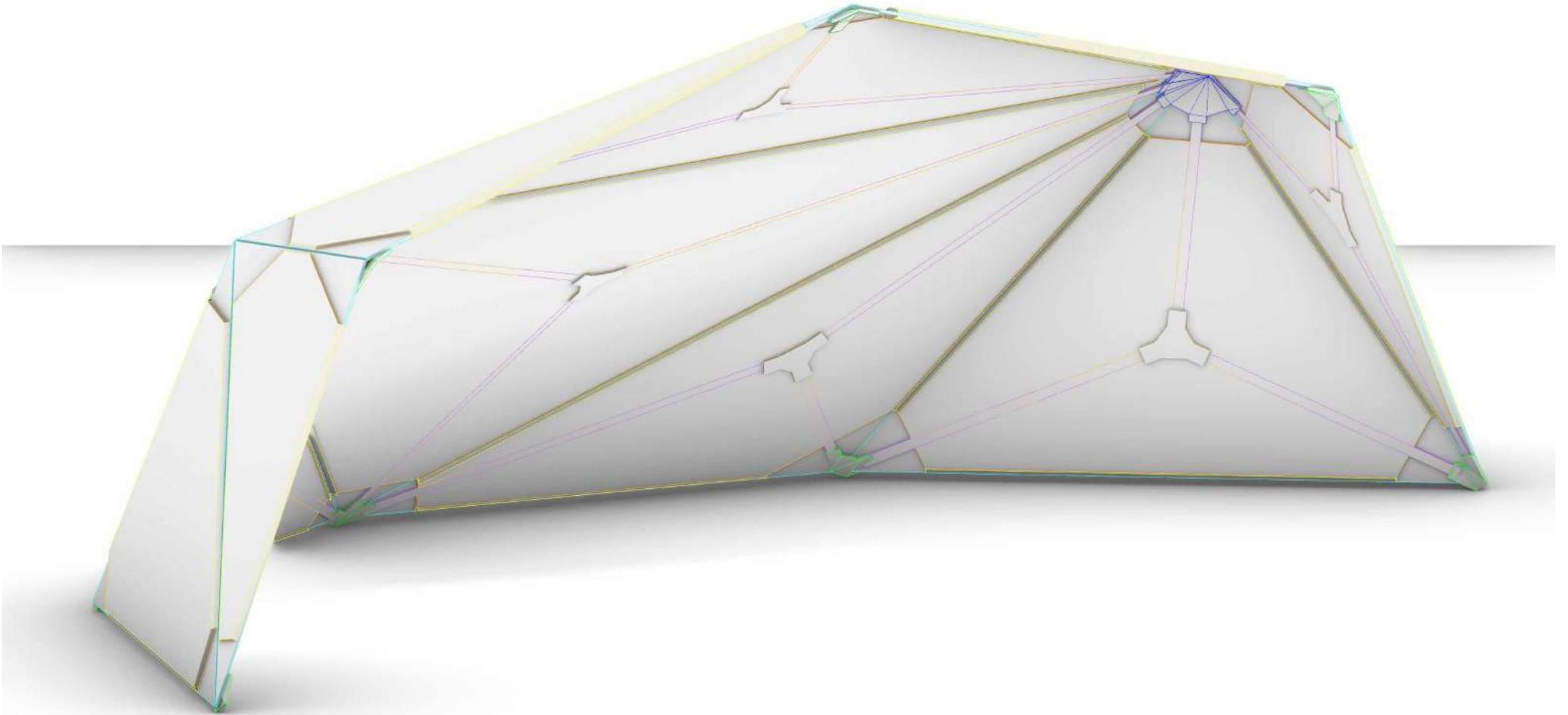
- Modo di vibrare 1: $T = 3,50 \text{ s}$
 $f = 0,28 \text{ Hz}$
- Modo di vibrare 2: $T = 3,01 \text{ s}$
 $f = 0,33 \text{ Hz}$
- Modo di vibrare 3: $T = 1,97 \text{ s}$
 $f = 0,50 \text{ Hz}$

11- ULTERIORI APPLICAZIONI

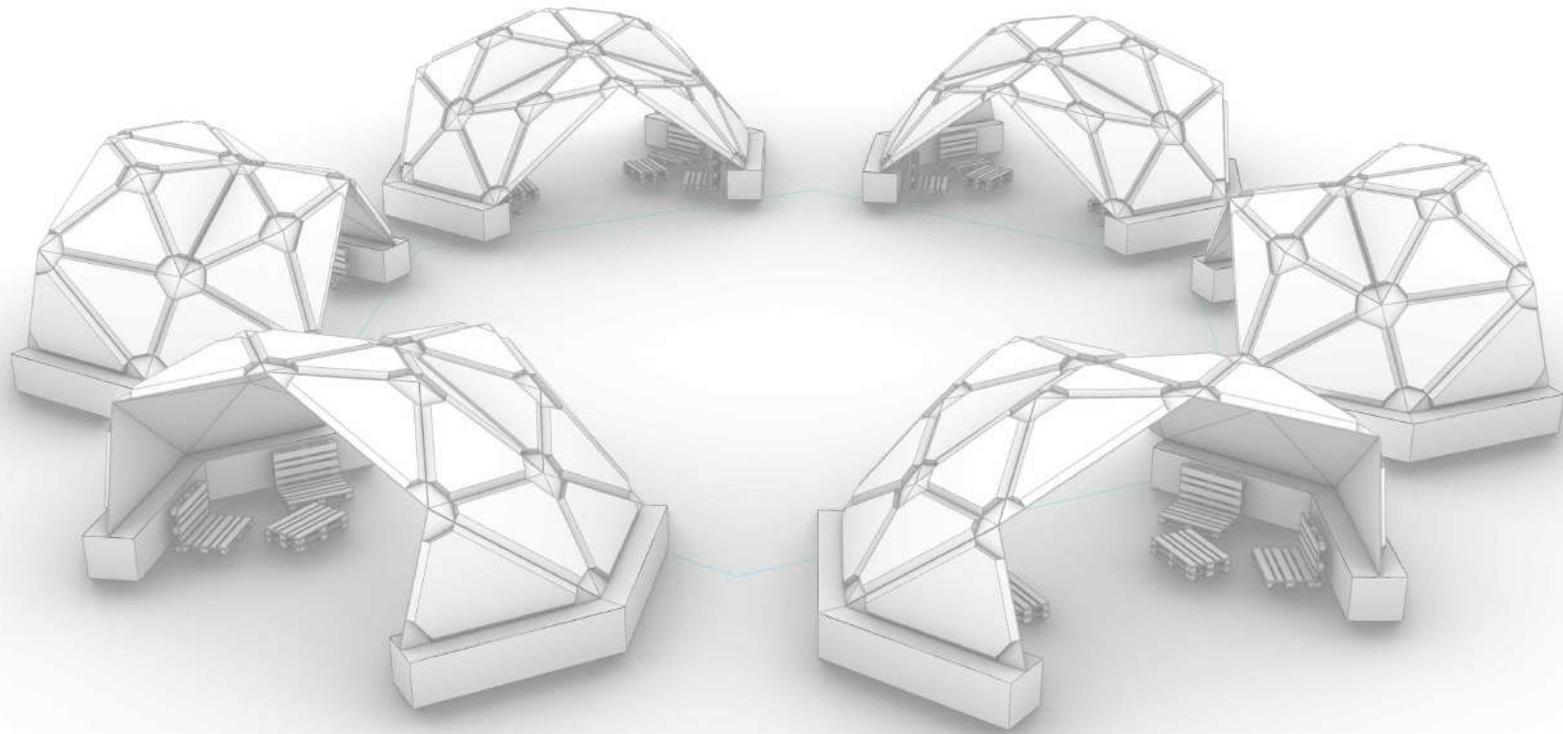
Lumen



Pensiline



Chillout



12- L'ARCHITETTURA SIMBIOTICA

"Molto spesso, quando ascolto l'elenco delle mie attività precedenti, mi chiedo se esista
L'intersezione di tali sistemi deve essere infatti sicuramente vuota."
[Benoit Mandelbrot, Woods Hole Oceanographic Institute, Agosto 1985]

CONCLUSIONI

“Il nostro senso della bellezza è ispirato dalla combinazione armonica di ordine e disordine quale si presenta in oggetti naturali: in nuvole, alberi, catene di montagne o cristalli di neve. Le forme di tutti questi oggetti sono processi dinamici consolidati in forme fisiche, e particolari combinazioni di ordine e disordine sono tipiche di tali forme.”

[Gert Eilenberger, Freedom, Science and Aesthetics, in Schönheit im Chaos]

L'approccio adottato per questa tesi non è stato convenzionale; le fasi progettuali non sono state condotte secondo regole compositive di carattere stilistico o estetico, scaturiscono bensì dall'osservazione e dalla simulazione digitale di fenomeni fisici naturali che hanno caratterizzato il lavoro di vari progettisti in passato. La struttura interna del pannello che compone i manufatti progettati non deriva da un modello precedentemente sviluppato, ma dalla necessità di risolvere questioni tecnologiche e costruttive utilizzando determinati materiali e determinate tecniche, tradizionali ed innovative. La scelta di sperimentare con un materiale nuovo, fundamentalmente diverso dai materiali solitamente utilizzati in edilizia, mi ha permesso di immaginare un nuovo modo di fare architettura in simbiosi con processi di crescita biologica che assicurassero alte performance con un impatto ambientale minimo.

Eppure queste strutture hanno una caratteristica che si manifesta solo quando vengono visualizzate nella loro interezza: l'autosomiglianza; presentano cioè una omotetia interna, ovvero una simmetria da una scala a un'altra che implica la ricorsione, una struttura all'interno di una struttura. Le strutture caratterizzate da questa omotetia interna seguono la logica della geometria frattale, termine coniato nel 1975 da Benoit Mandelbrot nel libro *Les Objets Fractals: Forme, Hasard et Dimension*.

La geometria frattale caratterizza le strutture naturali: in un albero la struttura di ogni ramo è approssimativamente simile all'intero albero e ogni rametto è a sua volta simile al proprio ramo e così via; i vasi sanguigni, dall'aorta ai capillari, formano un tipo di continuo ramificandosi e suddividendosi in un numero pressochè infinito di iterazioni fino a diventare così fitti che i globuli del sangue, per passare, sono costretti a disporsi in fila indiana; la forma di una costa, se visualizzata con immagini riprese da satellite man mano sempre più grandi, mostra componenti dentellati che, se non identici all'originale, sono comunque molto simili; le montagne, le nuvole, i cristalli di ghiaccio, presentano tutti una geometria frattale.

La struttura frattale ha consentito alla natura di risolvere i problemi morfologici in maniera efficiente ed esteticamente appagante. Ma in che modo la natura è riuscita a sviluppare una sua architettura tanto complicata?

Secondo Mandelbrot le complicazioni esistono solo nel contesto della geometria euclidea tradizionale. Le strutture ramificate, come nei frattali, possono essere descritte con trasparente semplicità, con appena pochi bit di informazione. Il DNA non riesce a specificare il gran numero di bronchi, bronchioli e alveoli o la particolare struttura spaziale dell'albero che ne risulta, ma può specificare un processo ripetitivo di biforcazione e sviluppo. Processi come questi si adattano ai fini della natura.

Questi processi sono estremamente simili a quelli utilizzati in questa tesi per la scrittura dell'algoritmo sviluppato per la modellazione. La struttura del padiglione formata da triangoli viene suddivisa a sua volta in ulteriori triangoli che definiscono la struttura interna dei pannelli; a sua volta il micelio presenta a livello microscopico configurazioni reticolari spaziali che, durante la colonizzazione del substrato e la crescita, si organizzano in maniera strutturalmente efficiente nello spazio. Questa omotetia interna è manifesta, e assicura ai manufatti non solo funzionalità e versatilità, ma li veste di un valore estetico nuovo.

"L'apprezzamento dell'armoniosa struttura di un'architettura è una cosa, e l'ammirazione della selvaggia bellezza della natura un'altra. Ci fu un tempo in cui la pioggia, le foreste, i deserti, la boscaglia e le terre desolate rappresentarono ciò che la società stava cercando di soggiogare. Chi voleva trarre piacere estetico dalla vegetazione, lo cercava nei giardini."

[James Cleick, "Caos"]

Le scelte operate in questa tesi rappresentano un approccio sperimentale che sfrutta l'interdisciplinarietà per risolvere questioni architettoniche. Spaziando tra architettura, biologia, informatica e arte ho potuto sviluppare un processo versatile che permette di definire strutture di copertura autoportanti, che sfruttano una tecnologia facilmente realizzabile in autocostruzione e facilmente inseribili in una logica di economia circolare. Questo processo può essere applicato in tanti contesti diversi e a varie scale.

E' arrivato il momento di adottare un nuovo paradigma estetico che superi il gusto per le forme geometriche astratte proprie della geometria euclidea; questo approccio ha caratterizzato il movimento razionalista, che rifiutando la complessità della realtà si è posto in contrapposizione alle forme fluide della natura mediante l'uso di volumi regolari. E' necessario adottare un nuovo approccio che ricerchi nella natura le soluzioni progettuali a cui l'architettura ambisce, che rispecchi la complessità del mondo che ci circonda, delle comunità a cui apparteniamo, dei nostri bisogni e dei nostri ideali.

Non possiamo ridurre questa complessità a sistemi centralizzati e gerarchici, se non altro perchè questi sistemi male si adattano al periodo storico che stiamo attraversando, denso di cambiamenti e di sconvolgimenti anche repentini che ne minano la stabilità. Credo sia necessario sviluppare nuovi modelli che rispondano agli stimoli esterni tramite un'intelligenza diffusa e capillare.

BIBLIOGRAFIA

- S. Adriaenssens, P. Block, D. Veenendaal, C. Williams, Shell structures for Architecture: Form Finding and Optimization, Routledge (2014)
- A. Agkathidis, Generative Design, Laurence King Publishing Ltd (2015)
- A. Agkathidis, Biomorphic Structures, Laurence King Publishing Ltd (2017)
- M. Arbib, H. F. Mallgrave e J. Pallasmaa, Architecture and Neuroscience, TWRD Design Reader (2013)
- M. Atelli, C. Blasi, G. Boldini, B. Cignini, G. Cosenza, V. Emiliani, M. Marchetti, A. M. Maggiore, T. Pericoli, A. Ricciardi, A. Sisti, A. Stefani, Strategia Nazionale del Verde Urbano, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare
- A. Athanassiou, I. S. Bayer, C. Canale, L. Ceseracciu, M. Haneef, J. A. Heredia-Guerrero, Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties, in "Nature" (Gennaio 2017)
- S. Babbini, M. Baiguera, D. Dondi, M. Cartabia, C. Girometta, M. Pellegrini, A. M. Picco, E. Savino, Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites, in "MDPI" (Gennaio 2019)
- T. Bhat., C. Dekiwadia, S. John, M. Jones, P. Joseph, E. Kandare, J. Ma, A. Thomas, R. Yuen, C. H. Wang, Thermal Degradation and Fire Properties of Fungal Mycelium and Mycelium-Biomass Composite Materials, in "Nature" (Dicembre 2018)
- P. Bazzu, V. Talu, Tactical Urbanism 5 Italia, TaMaLaCà (2016)
- L. Bizzini, Officina Lieve 2.0, Tesi di Laurea in Architettura UniFi (2018)
- H. Blumenberg, La Legittimità dell'Età Moderna, Marietti Editrice (1992)
- S. Bonacchi, La Riqualficazione Urbana Su Base Culturale- Lumen, Tesi di Laurea in Teorie e Tecniche della Comunicazione Pubblica, UniFi (2020)
- R. Bucinelli, M. R. Islam, R. C. Picu, L. Schadler, G. Tudryn, Morphologi and Mechanics of Fungal Mycelium, in "Nature" (Ottobre 2017)
- T. Campbell, B. Garrett, O. Ivanova, C. Williams, Could 3D Printing Change the World?, in "Strategic Foresight Report", Atlantic Council, (Ottobre 2011)
- H. Casanova e J. Hernández, Public Space Acupuncture, Actar Publishers (2014)

L. Chiesi, Il doppio Spazio dell'Architettura, Liguori Editore (2010)

Consorzio di Bonifica 3 Medio Valdarno, Relazione generale: Progetto integrato di Mitigazione del Rischio Idraulico da Alluvioni e di Tutela e Recupero degli Ecosistemi e della Biodiversità sul Torrente Mensola nel Comune di Firenze (Dicembre 2016)

G. De Sando, Monte Labbro Parco Natura: Progetto di Valorizzazione del Parco Faunistico del Monte Amiata, Tesi di Laurea in Architettura UniFi (2019)

L. Fumeaux, E. Rey, Toward the Reduction of Environmental Impacts of Temporary Event Structures, in "Science Direct" (2014)

M. Gaizit, Living Matter: Biomaterials for Design and Architecture, Massachusetts Institute of Technology (2016)

J. Gleick, Caos, Rizzoli (1989)

ISPRA, Verso una Gestione Ecosistemica delle Aree Verdi Urbane e Peri-Urbane (2010)

F. Jabr, The Social Life of Forests, in "The New York Times Magazine", (Dicembre 2020)

A. Kilian, J. Ochsendorf, Particle-Spring Systems for Structural Form Finding, in "Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures" (Agosto 2005)

S. Mancuso, Plant Revolution, GIUNTI (2017)

S. Mancuso, La Pianta del Mondo, Gif Editori Laterza (2020)

N. Oxman, Age of Entanglement, in "Journal of Design and Science" (Gennaio 2016)

B. Rudofsky, Architecture Without Architects, Museum of Modern Art New York (1964)

P. Stamets, Mycelium Running: How Mushrooms can help save the World, Ten Speed Press (2005)

G. Tabellini, Mycelium Tecnics, Tesi di Laurea in Architettura UniBo (2015)

A. Tedeschi, AAD Algorithms-Aided Design, Le Penseur Publisher (2014)

World Health Organization, Urban Green Space Interventions and Health (2017)

RINGRAZIAMENTI