

GUSCI TEMPORANEI E RICOMPONIBILI:

*Utilizzo di un sistema multi-agente
per la generazione di un sistema
costruttivo a tasselli planari per
superfici a doppia curvatura*

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

LAUREA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA
CORSO DI INGEGNERIA EDILE - ARCHITETTURA

TESI DI LAUREA

in
ARCHITETTURA E COMPOSIZIONE ARCHITETTONICA III

GUSCI TEMPORANEI E RICOMPONIBILI:

*Utilizzo di un sistema multi-agente per la generazione di un
sistema costruttivo a tasselli planari per superfici a doppia
curvatura*

Candidata: Arianna Bartolotti

Relatore:
Prof. Alessio Erioli

Correlatrice:
Prof.ssa Giorgia Predari

Anno Accademico 2021/2022

Sessione III

INDICE

0. ABSTRACT.....	7
1. INTRODUZIONE.....	9
2. STRUTTURE A GUSCIO.....	15
3. AGENT BASED SYSTEMS.....	19
4. SEGMENTED TIMBER SHELLS.....	23
4.1 Padiglioni ICD ITKE.....	23
4.2 HexBox Canopy.....	29
5. METODO.....	33
6. DISTRIBUZIONE SULLA SUPERFICIE.....	37
6.1 Crescita sulla superficie.....	39
6.2 Contenimento su superficie.....	39
6.3 Circle Relaxation.....	41
6.4 Campionamento curvatura e raggio.....	45
6.5 Allineamento.....	47
6.6 Evitare linea parabolica.....	47
6.7 Generazione della topologia.....	49
7. TANGENT PLANE INTERSECTION.....	51
7.1 Tangent Plane Intersection.....	51
7.2 Applicazione.....	55
7.3 Studio casistica possibile.....	63
7.4 Gestione delle eccezioni.....	65
8. SISTEMA COSTRUTTIVO.....	67
8.1 Design for Disassembly.....	67
8.2 Legno.....	71
8.3 Sistema a pannello o a scatola vuota.....	73
8.4 Stratigrafia del pannello e giunti.....	75
8.5 Attacco a terra.....	77
9. ANALISI STRUTTURALE.....	79
9.1 Comportamento delle strutture a guscio a pannelli.....	79
9.2 Analisi Isogeometrica.....	81
9.3 Valutazione dei risultati.....	83
10. APPLICAZIONE ARCHITETTONICA.....	89
11. CONCLUSIONI.....	103
BIBLIOGRAFIA.....	105

0. ABSTRACT

Lo scopo della ricerca è quello di sviluppare un metodo di design che integri gli apporti delle diverse discipline di architettura, ingegneria e fabbricazione all'interno del progetto, utilizzando come caso di studio l'uso di una tettonica ad elementi planari in legno per la costruzione di superfici a guscio da utilizzare come padiglioni temporanei.

La maniera in cui ci si propone di raggiungere tale scopo è tramite l'utilizzo di un *agent based system* che funge da mediatore tra i vari obiettivi che si vogliono considerare, in questo caso tra parametri estetici, legati alla geometria scelta, e di fabbricazione. Si sceglie di applicare questo sistema allo studio di una struttura a guscio, che grazie alla sua naturale rigidità integra forma e capacità strutturale, tramite una tassellazione planare della superficie stessa.

Il sistema studiato si basa sull'algoritmo di *circle relaxation*, che viene integrato tramite dei comportamenti che tengano conto della curvatura della superficie in questione e altri comportamenti scelti appositamente per agevolare il processo di tassellazione tramite *tangent plane intersection*. La scelta di studiare elementi planari è finalizzata ad una maggiore facilità di fabbricazione ed assemblaggio prevedendo l'uso di macchine a controllo numerico per la fabbricazione e un assemblaggio interamente a secco e che non necessita di impalcature .

Il risultato proposto è quello quindi di un padiglione costituito da elementi planari ricomponibili in legno, con particolare attenzione alla facilità e velocità di montaggio degli stessi, utile per possibili strutture temporanee e/o di emergenza.

1. INTRODUZIONE

Questa tesi nasce dalla volontà di ricercare una modalità differente per affrontare un progetto architettonico, ovvero di investigare processi progettuali che integrano geometria, ragione strutturale e processi di fabbricazione con particolare riferimento alla creazione delle strutture a guscio. La ricerca si propone di trovare una metodologia di progetto che si relazioni con le varie componenti del mondo AEC: Architecture, Engineering, Construction (figura 1.1).

Nel passato l'unione tra forma architettonica e design strutturale è stata motivata da una ricerca di efficienza, economia ed eleganza (Block, et al., 2020).

In cui queste limitazioni auto-imposte sono in verità i punti di partenza per un progetto architettonico, generando grandi innovazioni nell'ambito delle tipologie strutturali. Ad esempio, nel caso di Heinz Isler e Frei Otto per il metodo delle funicolari, dato che si basano sulla sola trasmissione interna di sforzo normale. Entrambi lavoravano per form-finding, ottenendo una forma come iterazioni di forze in un medium materiale.

Ad oggi non è più sufficiente considerare semplicemente l'efficienza o l'economia del proprio progetto, ma è fondamentale considerarne anche l'impatto ambientale che questo apporta. È ormai noto come il settore delle costruzioni sia notevolmente impattante rispetto all'ambiente, con il 30% delle emissioni di CO² e il 40% delle emissioni di gas serra (figura 1.2). Le emissioni non sono l'unico ambito impattato dal settore delle costruzioni, per citarne alcuni sono rilevanti anche il consumo di risorse primarie, l'utilizzo di materiali non riciclabili e la creazione di rifiuti.

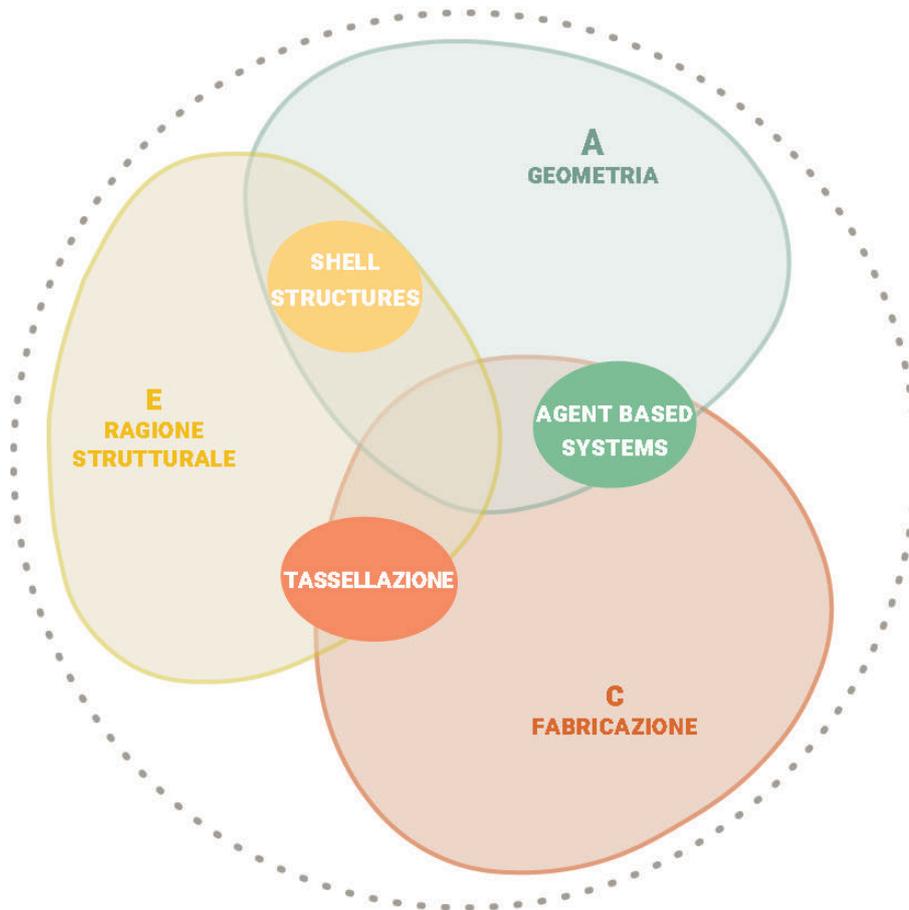


Figura 1.1

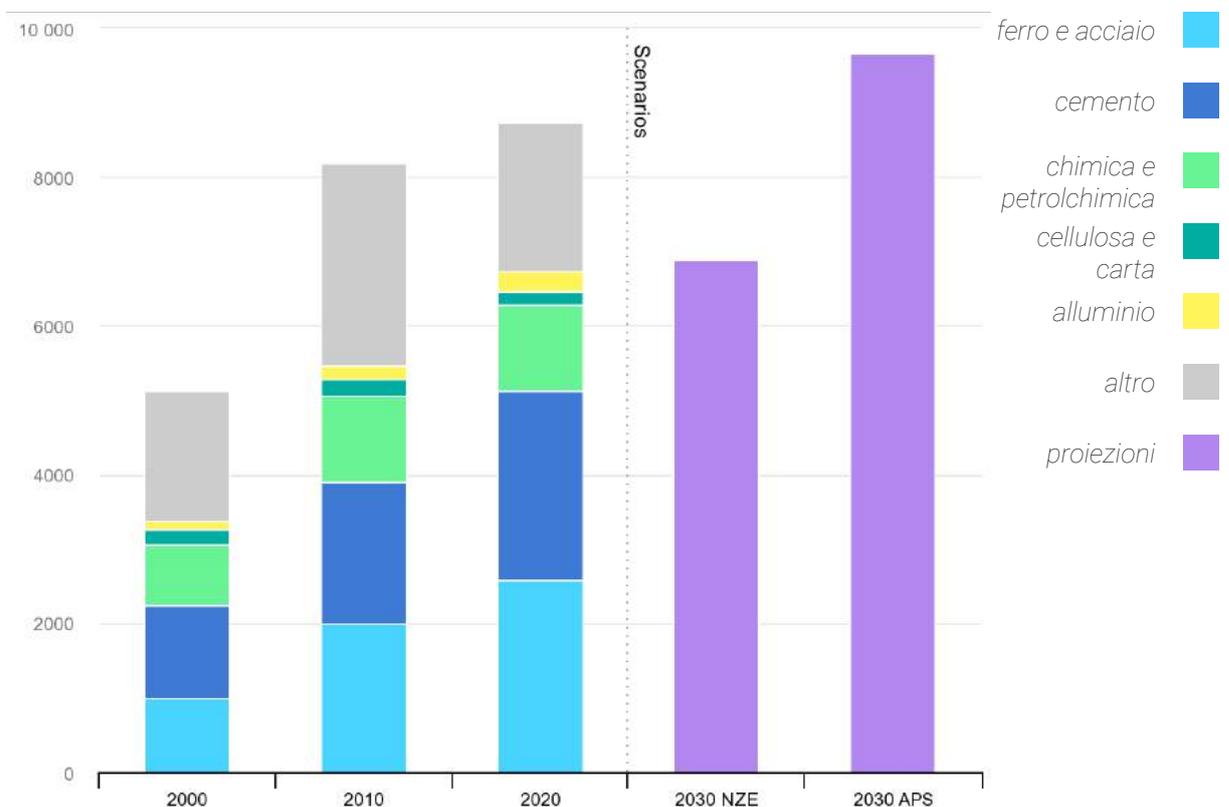


Figura 1.2 - IEA, Emissioni dirette di CO2 dal 2000 al 2030, e negli scenari Net Zero e Announced Pledges Scenarios, IEA Parigi, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/industry-direct-co2-emissions-in-the-net-zero-and-announced-pledges-scenarios-2000-2030>

Inoltre, guardando alle singole costruzioni i metodi utilizzati sono rimasti pressoché invariati da cento anni a questa parte. Tra i vari settori quello delle costruzioni è tra gli ultimi per i livelli di automazione e innovazione tecnologica e la maggior parte dei progetti costruiti segue archetipi ormai datati (figura 1.3).

La maggior parte dei progetti architettonici segue quello che viene definito da Mario Carpo in *The Alphabet and the Algorithm* (2011) un metodo "allografico", ovvero in cui l'idea del progetto e la costruzione del progetto sono due entità separate. Carpo ritrova l'origine del progetto allografico in Leon Battista Alberti, che per primo teorizzò nel *De Re Aedificatoria* che la vera opera dell'architetto sia il progetto dell'edificio e non l'edificio stesso, che per definizione viene costruito da qualcun altro; così facendo Alberti ci si separa dalla tradizione del mastro costruttore, e sancisce l'inizio della separazione fra progetto e realizzazione. Con Alberti nasce una forma esplicita della distinzione progetto-costruzione, consolidata nei secoli fino ad oggi, in cui il progetto viene definito a priori attraverso la notazione e solo successivamente per l'effettiva realizzazione. Il progetto si concretizza in una geometria astratta, definita tramite la sua notazione, che solo successivamente viene adattata alla realtà della sua costruzione.

Questa separazione nell'architettura tra progetto e realizzazione è la chiave fondamentale che porta all'unione tra architettura e industrializzazione, dove un progetto puramente geometrico è infinitamente ripetibile tramite prefabbricazione di elementi standard.

Questa modalità è tipicamente adattata a edifici anche modesti, dove la standardizzazione di elementi basilari e spesso di elementi costruttivi conduce a una predeterminazione di tutto ciò che viene a seguire; ma è particolarmente critica per progetti caratterizzati da geometrie non standard, che modificano l'approccio di generazione della forma architettonica ma che non possono però basarsi su metodi fondamentalmente non compatibili di realizzazione.

Il passaggio che sta avvenendo nella mentalità di concepire il progetto è di vederlo non come soluzione ad una geometria prescelta, o come modello previsionale, perché non si potranno prevedere tutte le conseguenze delle proprie azioni progettuali.

Il progetto è un'opportunità di rispondere a delle problematiche e a sua volta cambia l'ambiente e le condizioni iniziali di partenza. Il progetto è un sistema complesso in cui gli elementi sono molteplici e hanno relazioni reciproche e non lineari tra loro.

L'approccio che si vuole esplorare è quindi quello di studiare la possibilità di integrazione di contributi di discipline diverse che permettano di rispondere ai problemi e alle necessità odierne, senza essere costretti a utilizzare metodologie obsolete; con lo scopo, inoltre, di risolvere i problemi causati dal settore delle costruzioni per quanto riguarda l'impatto ambientale.

The construction industry is among the least digitized.

McKinsey Global Institute industry digitization index; 2015 or latest available data

Relatively low digitization  Relatively high digitization

● Digital leaders within relatively undigitized sectors



¹Based on a set of metrics to assess digitization of assets (8 metrics), usage (11 metrics), and labor (8 metrics).

²Information and communications technology.

Source: AppBrain; Bluewolf; Computer Economics; eMarketer; Gartner; IDC Research; LiveChat; US Bureau of Economic Analysis; US Bureau of Labor Statistics; US Census Bureau; McKinsey Global Institute analysis

McKinsey&Company

Figura 1.3 - Global industry digitisation index, McKinsey Global Institute

Per cui ci si concentra sullo studio di strutture leggere e multifunzionali, con un utilizzo efficiente dei materiali durante la realizzazione della struttura o nella sua eventuale demolizione. Infine, realizzando strutture leggere con materiali riutilizzabili si mantiene la possibilità di smontare la stessa quando questi risulti obsoleta, così da minimizzare gli sprechi associati alla fine del ciclo di vita della struttura.

Tra le strutture leggere e adattabili ci si propone di analizzare le strutture a guscio, quali esempi particolarmente significativi di integrazione tra forma e capacità strutturale. Inoltre, sono una tipologia di struttura che permette grande flessibilità funzionale utile per possibili strutture temporanee e/o di emergenza, delle quali cresce la richiesta, come ad esempio padiglioni ospedalieri o punti di accoglimento.

La metodologia esplorata vuole applicare al tipo di superficie scelta un sistema multi-agente come mediatore tra obiettivi diversi, principalmente tra geometria e il processo di fabbricazione, tramite la tassellazione della superficie in elementi piani che possano essere assemblati e disassemblati.

La superficie può essere studiata caso per caso a seconda delle necessità presenti; che siano di funzione, capienza o alla volontà di design che si vuole esprimere. Il metodo invece viene studiato per essere applicabile alla specificità del progetto in questione.

2. STRUTTURE A GUSCIO

Le strutture a guscio sono sistemi descritti da superfici tridimensionali curve, in cui una dimensione, lo spessore, è significativamente più piccola delle altre due. Sono strutture solitamente “form-passive” ovvero che resistono agli sforzi in maniera passiva per lo più grazie allo sforzo longitudinale senza modificare la propria forma, mentre al contrario una struttura “form-active” reagisce agli sforzi modificando la propria forma, come nel caso di cavi o strutture a membrana.

Le strutture a guscio sono un esempio architettonico in cui la forma determina la capacità resistente della struttura stessa; mentre nello schema classico a telaio pilastro-trave la resistenza è dovuta e calcolata grazie alla capacità del materiale, nelle strutture a guscio il problema assume carattere puramente geometrico. Per questo motivo, nel caso del telaio la struttura non è scalabile poiché la resistenza del materiale non aumenta in modo proporzionale al volume della struttura stessa, come scritto da Galilei in *Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali* (figura 2.1).

“[...] chi volesse mantener in un vastissimo gigante le proporzioni che hanno le membra in un uomo ordinario, bisognerebbe o trovar materia molto più dura e resistente, per formarne l'ossa, o vero ammettere che la robustezza sua fusse a proporzione assai più fiacca che negli uomini di statura mediocre; altrimenti, crescendogli a smisurata altezza, si vedrebbero dal proprio peso opprimere e cadere. [...]”

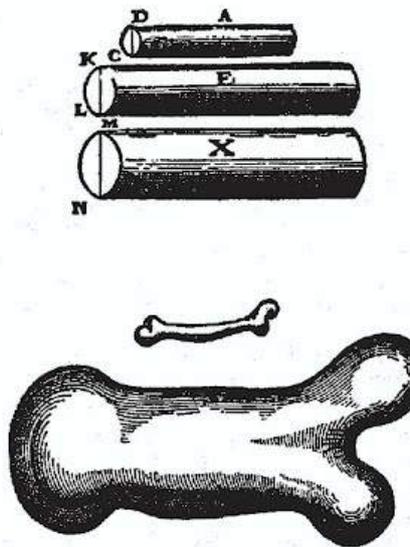


Figura 2.1 - Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali*

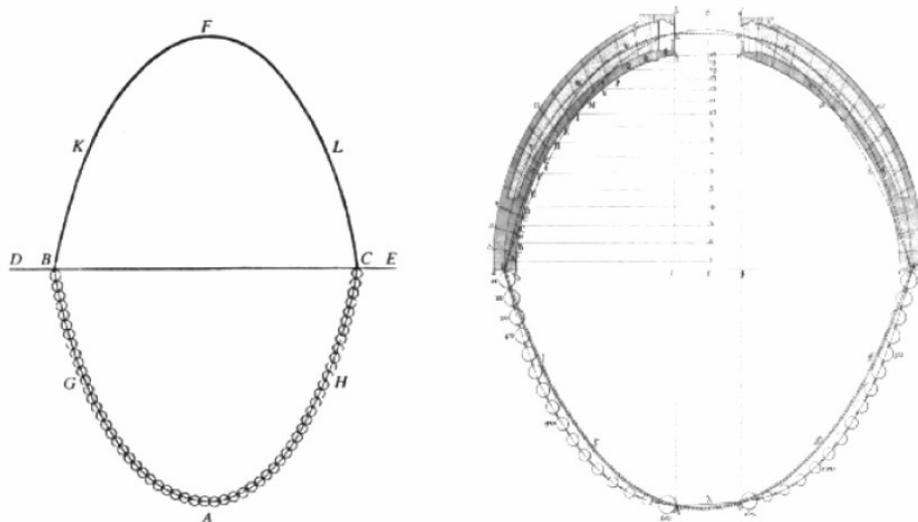


Figura 2.2 - Disegno di Poleni, analogia tra il modello della catena appesa e la cupola di San Pietro a Roma, 1748.

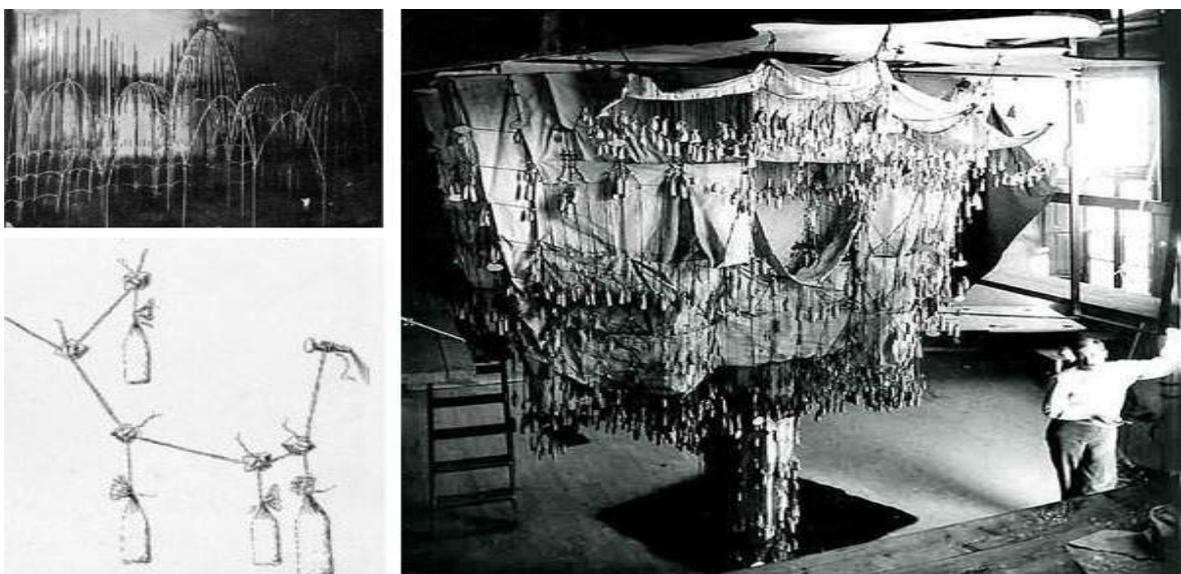


Figura 2.3 - metodo del modello appeso utilizzato per la cripta della Colònia Güell (a sinistra), successivamente utilizzato anche per la Sagrada Família (a destra). (Mingle, 2017)

Mentre nel caso delle strutture a guscio è la forma stessa che ne garantisce la resistenza, rendendo possibile scalare la stessa struttura senza che la distribuzione delle forze cambi. Proprio per questo principio, i primi esempi di strutture a guscio nella storia dell'architettura sono le volte e le cupole, costruite con materiali con resistenza solamente a compressione, ad esempio pietra e mattoni, ma che comunque riescono ad ottenere strutture di grandi dimensioni e capacità spaziale senza l'utilizzo di appoggi intermedi. Poiché l'utilizzo del l'arco, forma geometrica più simile alla funicolare, consente alle volte e alle cupole di funzionare tramite sforzi di pura compressione (figura 2.2). Il principio di resistenza data dalla geometria che permette la realizzazione delle strutture a guscio è quindi già presente nella storia dell'architettura fin quasi dal suo principio, ma in particolare il Ventesimo secolo è ricco di esplorazioni delle potenzialità delle strutture a guscio.

Nel ventesimo secolo le strutture a guscio in cemento armato rappresentano appunto l'apice dello sforzo ingegneristico, soprattutto per quanto riguarda la ricerca di una forma ottimale tale da permettere strutture estremamente leggere e sottili. Tra i più celebri esempi si trovano Frei Otto, Heinz Isler e Antonio Gaudì, i quali sfruttavano l'utilizzo di modelli fisici appesi per ricercare la forma.

I modelli appesi, esattamente come nel principio della catenaria, erano composti di superfici elastiche senza resistenza a flessione, che sotto al proprio peso si deformava fino ad arrivare ad una conformazione sottoposta unicamente a sforzi di tensione; Quando questa forma veniva poi capovolta per simulare l'effetto di inversione della gravità, in questo modo cambia il verso degli sforzi interni che diventano da trazione a compressione; ed l'esito è quindi una forma che agisce per sforzi puramente di compressione. In particolare, i modelli di Gaudì utilizzavano delle corde come catenarie, che tramite operazioni booleane davano come risultato delle superfici di rivoluzione (figura 2.3). Uno dei motivi per cui questo metodo di costruzione delle strutture a guscio è caduto in disuso è il costo e la difficoltà di costruzione delle impalcature necessarie alla realizzazione di tali altezze sono molto elevati, soprattutto se si utilizzano tecniche tradizionali di realizzazione.

In generale è possibile definire diverse tipologie di strutture a guscio (Adriaenssens, et al., 2014) in base ai parametri di generazione della loro geometria:

- Le strutture a guscio composte da una superficie "free form" o superficie libera, ovvero definite in maniera arbitraria senza logiche di formazione e/o connessione al comportamento delle forze interagenti.
- Le strutture a guscio definite da un'equazione matematica, solitamente trigonometrica o polinomiale, come per esempio paraboloidi.
- Infine, le strutture a guscio ottenute per "form finding" ovvero tramite dei modelli, che possono essere sia fisici che computazionali, che si basano solitamente sul peso proprio della struttura e sui carichi esterni.

3. AGENT BASED SYSTEMS

Il proposito di interesse è quello di ricercare un metodo integrazione di strutture a guscio e l'utilizzo di agent-based systems, in modo da osservare come imponendo comportamenti geometrici e strutturali quali effetti architettonici e spaziali si possono generare, senza definire a priori dei risultati ma esplorando le potenzialità stesse del sistema.

I sistemi multi-agente sono modelli nati come forma di approccio all'intelligenza artificiale (Russell & Norvig, 2010) e discendono dalla cibernetica (Dorigo & Bonabeau, 1999); Reynolds nel 1987 li utilizzò come modello di simulazione di fenomeni complessi non descrivibili da equazioni in forma chiusa. I sistemi multi-agente sono composti da una serie di agenti elementari; si definisce un agente un'entità in grado di percepire l'ambiente in cui si trova ed agire per modificarlo. I sistemi multi-agente sono sistemi nei quali una popolazione di agenti interagisce a vari livelli tra componenti della popolazione e/o con l'ambiente in forme dirette o indirette. Dove c'è eterogeneità tra le caratteristiche dell'agente e nel loro ambiente possono generarsi comportamenti differenti.

L' "emergence" è una proprietà dei sistemi complessi che nessuno dei singoli agenti possiede ma che si manifesta a livello globale come risultato dell'interazione locale tra gli agenti e il sistema. Le proprietà emergenti non sono predefinite o derivanti da un ordine imposto, e non sono prevedibili a partire dalla sola descrizione del sistema (Johnson, 2012; Colchester, 2016).



Figura 3.1 - Banco di pesci.



Figura 3.2 - Ghardaïa, Libia. Foto di George Steinmetz.



Figura 3.3 - Stormo di uccelli in volo. Foto di Owen Humphreys.

I sistemi multi-agente infatti agiscono tramite auto-organizzazione che sorge da interazioni locali tra gli agenti iniziali sotto forma di comportamenti coerenti che possono agire a diversi livelli del sistema. L'auto-organizzazione crea quindi una forma di "intelligenza collettiva" che prescinde da quella del singolo agente, che è al contrario molto limitato e non è in grado di conoscere il sistema globale ma solo ciò con cui può interagire.

L'intelligenza collettiva, o *swarm intelligence*, si definisce come il comportamento collettivo di sistemi decentralizzati e auto-organizzati, naturali o artificiali; il concetto nasce dallo studio dell'intelligenza artificiale e viene successivamente applicato alla biologia. L'espressione è introdotta da Gerardo Beni e Jing Wang nel 1989, nel contesto di sistemi robotici cellulari.

È una proprietà tipica di sistemi biologici privi di controllo centralizzato, come per esempio branchi di pesci o stormi di uccelli, dove le formazioni che si creano non sono il risultato di una gerarchia piramidale ma nascono dal comportamento emergente degli individui (figura 3.1).

Esistono esempi anche in urbanistica di comportamenti emergenti: gli agglomerati urbani non pianificati sono il frutto della ripetizione di protocolli di costruzione e crescita condivisi. L'azione locale e il costante feedback globale portano ad una stabilizzazione ed un ordine d'insieme (figura 3.2). Le caratteristiche principali dei sistemi multi-agente sono la capacità di adattamento e la capacità di cognizione ambientale. L'adattamento è il modo in cui i sistemi complessi sono in grado di adattarsi a pressioni esterne riorganizzando la propria struttura interna o alterando i comportamenti collettivi tra agenti; e la cognizione ambientale è la capacità fondamentale di percepire tramite feedback l'ambiente, per poi poterci interagire. Il feedback è proprio la caratteristica fondamentale di tutti i sistemi complessi perché permette al sistema di reagire con sé stesso e con il proprio ambiente.

Gli studi più famosi sui sistemi multi-agente sono il modello di interazione diretta dei Boids System di Craig Reynolds (1987) e il modello di interazione indiretta di Jeff Jones (2010).

Il sistema di Craig Reynolds studia il comportamento degli uccelli in volo, detto anche come comportamento *flocking*. Il suo sistema è composto da agenti che percepiscono la presenza di vicini e di ostacoli nell'ambiente, e che di conseguenza agiscono seguendo tre tipi di comportamenti base: la coesione, la separazione e l'allineamento.

Secondo la coesione gli agenti cercano di portarsi nella posizione media rispetto ai propri vicini, per la separazione cercano di rimanere ad una distanza minima quando si avvicinano troppo ai loro vicini e infine per allineamento cercano di sterzare allineando la loro direzione di movimento secondo quella dei propri vicini.

Il movimento totale generato non è deciso e né è prevedibile a priori ma emerge dalle interazioni che i vari agenti agiscono direttamente sui propri vicini (figura 3.3).

Il modello studiato da Jeff Jones è al contrario di quello di Reynolds un modello di interazione indiretta; ovvero non c'è interazione tra agente ed agente, ma ogni agente opera delle modifiche all'ambiente in cui si trova il sistema e ogni agente interagisce poi con i segnali che sono stati memorizzati nell'ambiente. Questo tipo di sistema è detto *stigmergico*.

4. SEGMENTED TIMBER SHELLS

4.1 Padiglioni ICD ITKE

Sono stati di fondamentale ispirazione i lavori dei padiglioni dell'Università di Stuttgart di ICD ITKE, che studiano metodi di design computazionali basati su sistemi complessi secondo principi di biomimetica, simulando comportamenti di sistemi multi-agente presenti in natura. Questi, sono integrati con metodi costruttivi che possano sfruttare al massimo le potenzialità delle tecnologie digitali odierne.

Citando appunto Achim Menges:

“The ability of complex adaptive systems (such as swarm systems) to adapt to varying conditions and accommodate change makes agent-based modeling a particularly suitable method for design integration and design interaction within a rule-based system. Properties of agent systems that are relevant in the context of architectural design include self-organization, adaptation, emergence, and the capacity to negotiate conflicting goals within one system.”

Alcuni progetti particolarmente rilevanti sono il LAGA Exhibition Hall (Schwinn, et al., 2014) ed il BUGA Wood Pavilion (Alvarez, et al., 2019), che rappresentano l'uno la continuazione dell'altro.

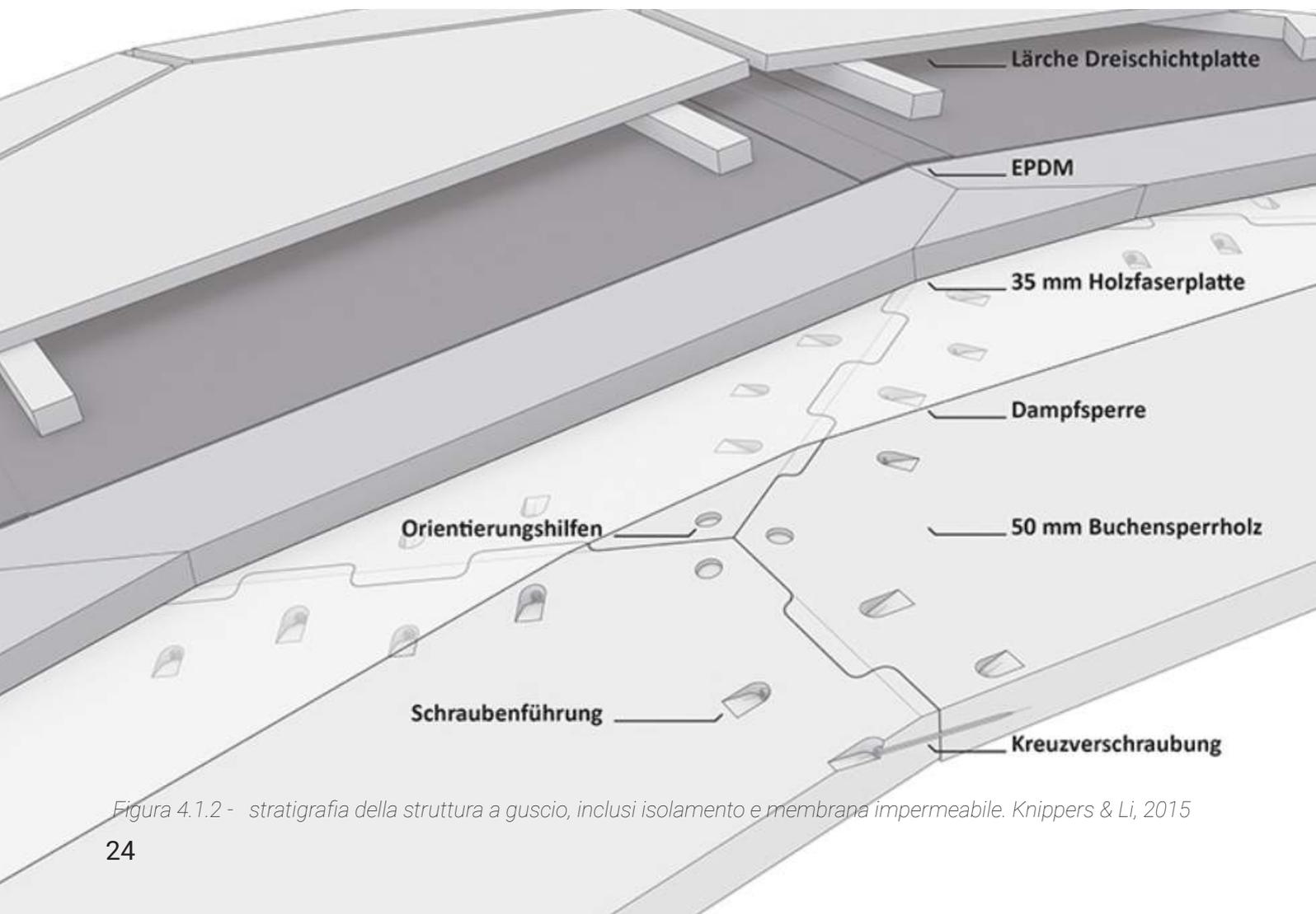


Figura 4.1.2 - stratigrafia della struttura a guscio, inclusi isolamento e membrana impermeabile. Knippers & Li, 2015

Il Landesgartenschau Exhibition Hall è stato concepito dall'Università di Stuttgart come progetto in collaborazione tra l'Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) e l' Institute of Computational Design (ICD), per la ricerca sulla Robotic Timber Construction. È stato realizzato nel 2014 a Schwäbisch Gmünd in Germania e ha fatto parte della biennale Landesgartenschau, una mostra sul giardinaggio e l'orticoltura regionale, dove ha accolto una mostra di ForstBW (figura 4.1.1).

Il Landesgartenschau Exhibition Hall, o LAGA è quindi un padiglione realizzato in pannelli di 50 mm piani di compensato di faggio, la cui geometria è basata studiando i principi di funzionamento degli scheletri dei ricci di mare, costituiti da lastre in carbonato di calcio unite da porzioni interconnesse simili ai giunti "finger joints" che vengono appunto usati per i collegamenti; questi vengono chiamati così dalla forma che ricorda appunto delle dita intrecciate e vengono ulteriormente rinforzati tramite delle viti metalliche.

La forma è ottenuta tramite metodi computazionali che simulano in architettura i principi biomimetici, includendo anche caratteristiche strutturali e di fabbricazione. Infine, la realizzazione avviene tramite prefabbricazione dei singoli pannelli tramite l'utilizzo di un braccio robotico che realizza la forma di ogni pannello e la segmentazione dei bordi per rendere possibili i collegamenti tramite "finger joints" (figura 4.1.2).

Il Bundesgartenschau Wood Pavillion (figura 4.1.3) è un progetto realizzato nel 2019 al centro dell'isola d'estate nel Bundesgartenschau a Heilbronn, Germania. Anche questa è una mostra di giardinaggio e architettura del paesaggio organizzata in Germania a cadenza biennale, ogni volta in una diversa città.

Il secondo progetto, il Bundesgartenschau Wood Pavillion, o BUGA, è l'evoluzione del primo, poiché ne segue gli stessi principi ma studiando un metodo differente di realizzazione dei pannelli, ovvero tramite un sistema di pannelli a doppio strato, vuoti al loro interno (figura 4.1.4). Ottenendo in questo modo un'area coperta di circa il triplo rispetto al suo predecessore utilizzando la stessa quantità di materiale primo al metro quadro di superficie. (figura 4.1.5).

I moduli scatolari sono realizzati da un pannello superiore e uno inferiore dotato di un'apertura, uniti assieme da un anello di pannelli laterali corredati anche questi con dei "finger joints". Questi elementi sono incollati assieme in modo da formare un'unica entità strutturale e vengono poi montati in situ grazie all'apertura all'intradosso, per formare l'intera struttura. L'apertura inferiore nel modulo scatolare oltre che a influenzare il carattere architettonico dell'opera, permette di accedere alle connessioni tra i moduli, che sono realizzate tramite i finger joints, che trasmettono le forze di membrana, e delle viti aggiuntive che assorbono gli sforzi fuori dal piano del pannello.



Figura 4.1.3 - Bundesgartenschau Wood Pavilion. Alvarez, et al. 2019

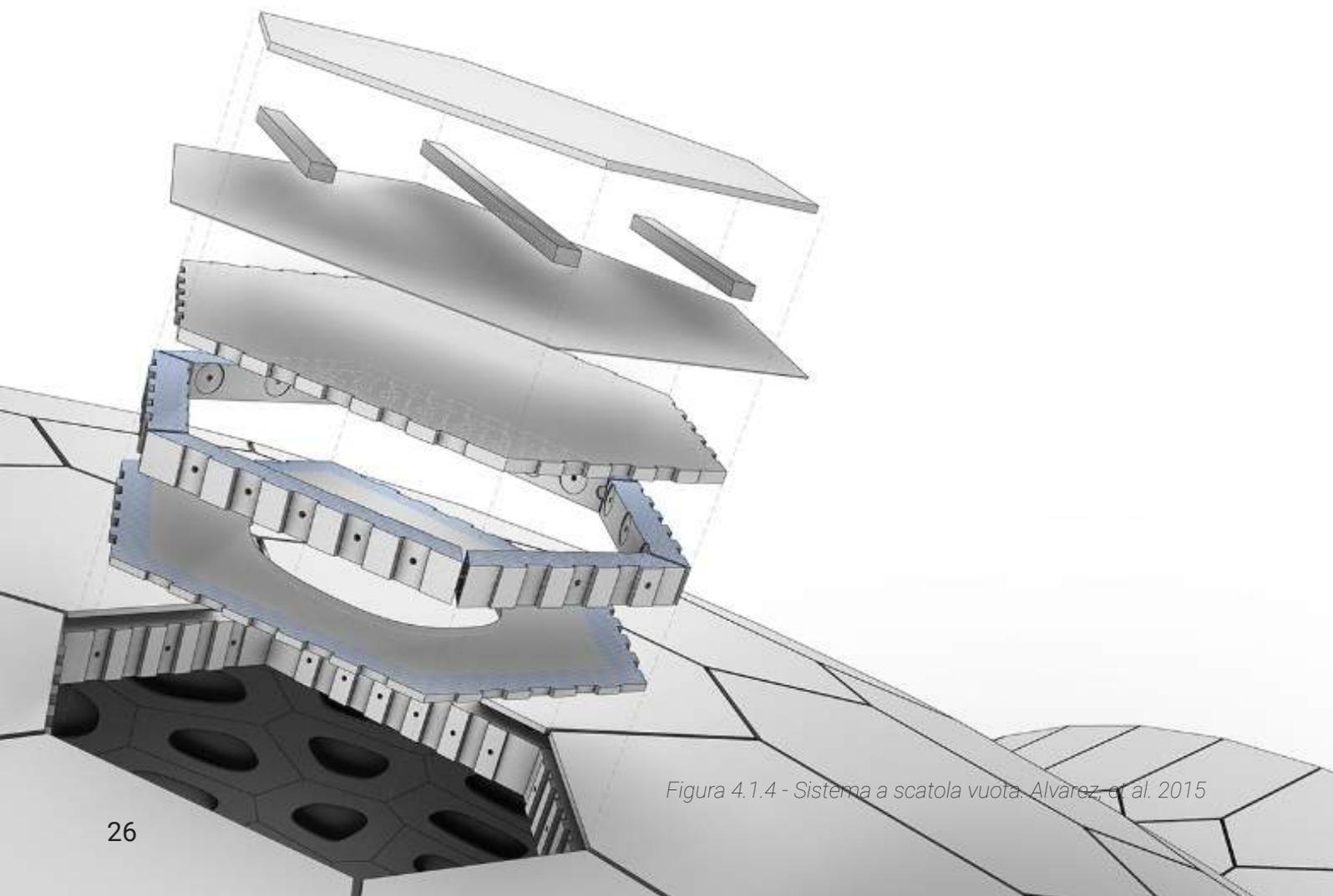
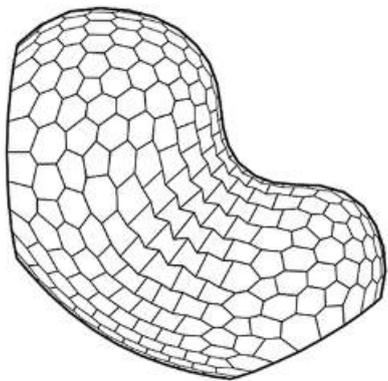
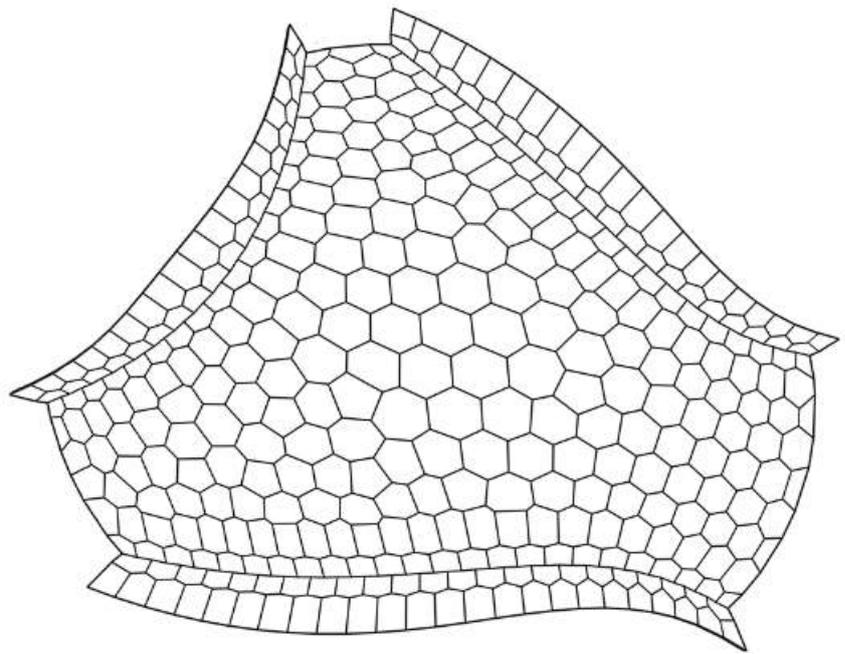


Figura 4.1.4 - Sistema a scatola vuota. Alvarez, et al. 2015



LAGA Pavilion

36.8 kg/m²
11m Span



BUGA Pavilion

36.0 kg/m²
30m Span

Figura 4.1.5 - Confronto tra i due padiglioni. Menges & Knippers, 2019



Figura 4.2.1 - HexBox Canopy, Tagliaboschi, 2020.

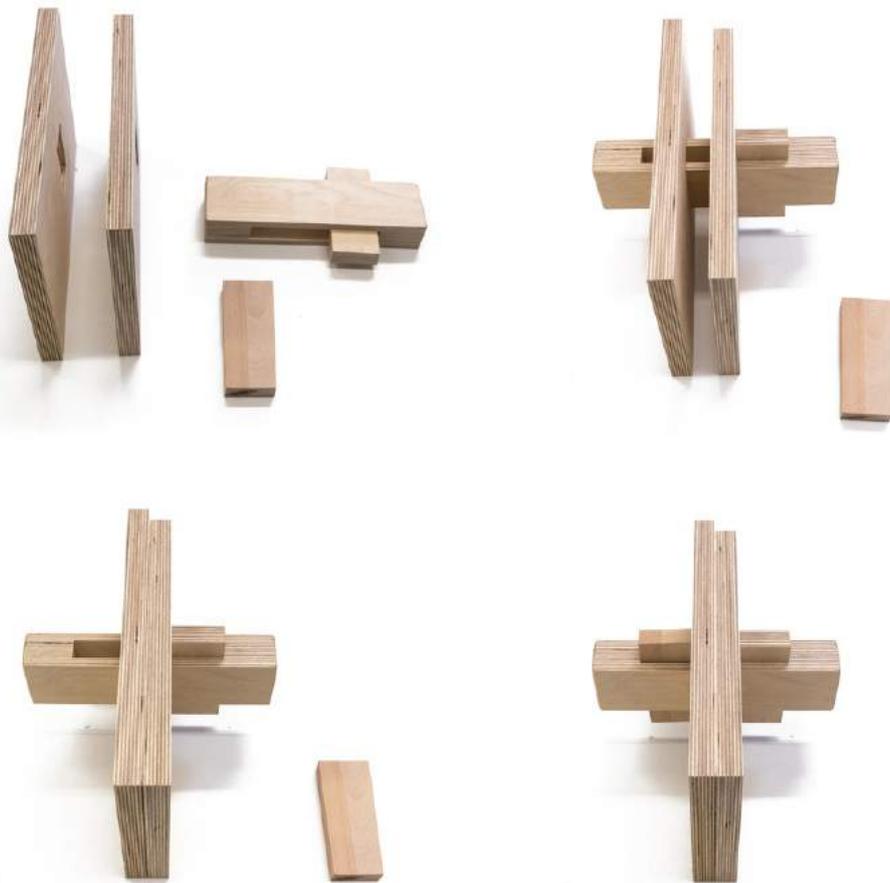


Figura 4.2.2 - Sistema ad incastro con cuneo. Tagliaboschi, 2020.

4.2 HexBox Canopy

Un altro esempio di una copertura sperimentale a guscio segmentato è il progetto HexBox Canopy (figura 4.2.1) realizzato in collaborazione tra l'Università di Kaiserslautern e l'Università di Sydney, assemblato e messo in opera da degli studenti presso l'Università di Sydney nel 2019 (Tagliaboschi, 2020). È infatti realizzata nella terrazza del Wilkinson Building, dove risiede la facoltà di Architettura, Design e Planning.

Tale progetto prevede l'utilizzo di moduli scatolari in legno multistrato, in particolare è costruita con 1531 elementi differenti che compongono 201 moduli strutturali, ed impiega un sistema costruttivo a secco che non richiede l'utilizzo di centine e ne permette il rapido montaggio.

Le connessioni sono realizzate esclusivamente con componenti lignei senza aggiunta di connessioni metalliche, al contrario degli esempi precedenti che prevedevano l'utilizzo di viti per assorbire i maggiori sforzi flessionali. Infatti, la novità di questo progetto consiste nell'utilizzo di connettori lignei, ottenuti dal materiale di scarto nella lavorazione dei pannelli principali, che funzionano come giunti a cuneo di tipo tenone-mortasa, impiegati nella carpenteria artigianale e nell'ebanisteria (figura 4.2.2).



Figura 4.2.3 - costruzione del padiglione LAGA. Menges, Schwieger, & Knippers, 2014



Figura 4.2.4 - Costruzione del padiglione HexBox. Tagliaboschi, 2020.



Figura 4.2.5 - costruzione del padiglione BUGA. Menges & Knippers, 2019

I connettori vengono inseriti all'interno di tasche presenti tra un pannello e l'altro e vengono fissati tramite dei cunei dalla forma affusolata che permettono un graduale serraggio delle connessioni eliminando eventuali spazi tra i pannelli dovuti alle tolleranze di assemblaggio. In questo modo è possibile l'assemblaggio dei moduli anche dove siano presenti piccole imperfezioni geometriche, ottenendo aderenza e continuità nelle interfacce dei moduli, fondamentale per le prestazioni globali della struttura a guscio.

Pur utilizzando un metodo di fabbricazione e di connessione diverso rispetto ai padiglioni di ICD ITKE, i risultati sono comparabili: mentre per il montaggio del LAGA e del BUGA sono stati impiegati rispettivamente quattro settimane (considerando un'aggiunta di infissi e finiture esterne) e dieci giorni (solo per la realizzazione della struttura); per l'Hexbox sono stati impiegati sei giorni per realizzare la struttura tramite i moduli struttura, senza l'impiego di gru e solo tramite una piccola impalcatura e delle scale. Il tempo di montaggio dell'HexBox è sicuramente dato dalle dimensioni ridotte rispetto ai padiglioni precedenti e dalla possibilità di avvalersi di esperienze precedenti; nonostante questo i risultati sono comparabili (figura 4.2.3, 4.2.4, e 4.2.5).

	LAGA	BUGA	HexBox
Tempo di costruzione	4 settimane	10 giorni (+ tempo finiture)	6 giorni (+ tempo finiture)
Attrezzi utilizzati	Gru e autogru	Gru e autogru	Scale e impalcature
Area coperta (m²)	125	500	45
Materiale utilizzato (m³)	12	45	3.65
Materiale utilizzato (kg/m²)	36.8	36.0	36.5

5. METODO

La metodologia esplorata sfrutta l'utilizzo di un agent based system per la mediazione di obiettivi legati sia all'estetica che alle logiche di fabbricazione e montaggio. L'agent based system è composto da una serie di agenti, caratterizzati da una posizione da un raggio, che si distribuiscono su una superficie a scelta, caratterizzata da una doppia curvatura, tramite diversi comportamenti che riguardano sia l'interazione degli agenti con i propri vicini, che con l'ambiente in cui si trovano.

I comportamenti tra gli agenti stessi sono:

- La crescita del numero di agenti fino al numero massimo stabilito da due punti di origine.
- Lo spostamento degli agenti sulla superficie che si respingono gli uni dagli altri.
- L'allineamento degli agenti che si trovano abbastanza vicini fra loro secondo una delle due coordinate relative alla superficie, u o v.

I comportamenti tra l'agente e l'ambiente in cui si trova sono:

- Il contenimento sulla superficie di partenza, nel caso un agente si sposta al di fuori di essa viene proiettata la sua posizione sulla superficie.
- Il raggio di ogni agente viene calcolato ad ogni iterazione in base alla curvatura della sua posizione sulla superficie.
- Gli agenti si allontanano dalla zona della superficie caratterizzata da curvatura gaussiana nulla.

Una volta ottenuta la distribuzione sulla superficie degli agenti si crea una mesh con le posizioni degli agenti stessi dei vertici. La mesh viene generata tramite metodo *ball pivot* ovvero considerando connessi i punti vicini entro un certo raggio.

Dalla mesh si estraggono varie informazioni, tra cui le posizioni dei vertici, che corrispondono alle posizioni degli agenti, i vertici collegati ad ogni vertice ed il numero di vertici collegati, ovvero se il vertice è centrale o di bordo.

Da queste informazioni è possibile discretizzare la superficie in tasselli planari tramite la *tangent plane intersection*.

6. DISTRIBUZIONE SULLA SUPERFICIE

La distribuzione sulla superficie è studiata a partire da un sistema di particelle che crescono dai punti di origine e che agiscono con dei comportamenti di repulsione reciproca, mantenendo sempre la propria posizione sulla superficie. Questo sistema si può definire come *circle relaxation*, ovvero un algoritmo semplificato di *circle packing*.

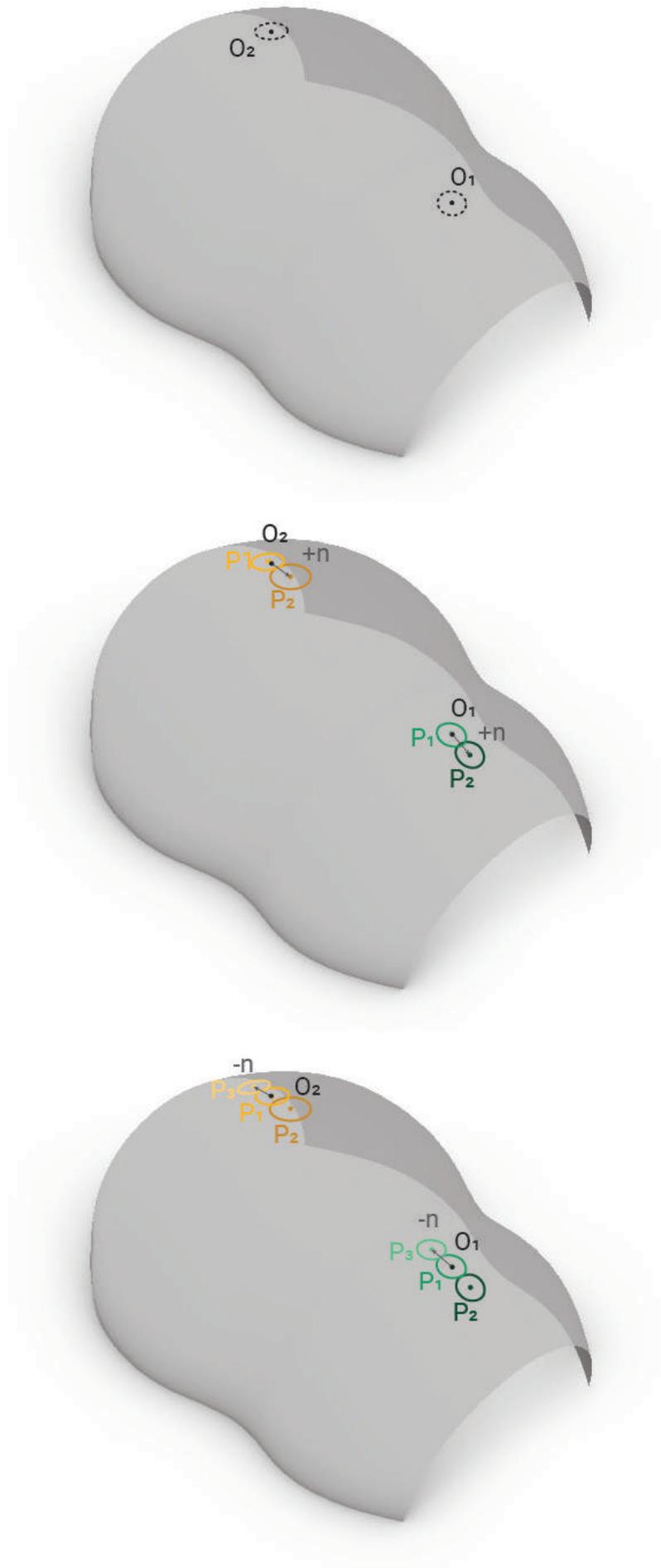


Figura 6.1.1 - Crescita sulla superficie

6.1 Crescita sulla superficie

La crescita degli agenti parte dai punti di posizione iniziale, che vengono presi come punti origine fissi, anche quando le posizioni dei vari agenti sono state spostate.

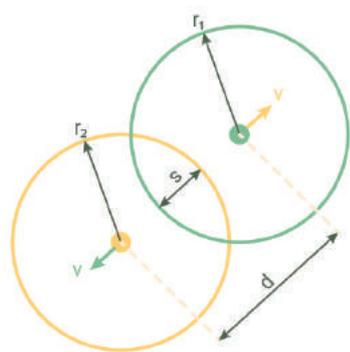
Dalle due origini (il cui numero dipende dal numero di agenti di partenza, dei quali ne vengono scelti appunto due) vengono generati dei nuovi agenti ad ogni 5 iterazioni, in maniera leggermente spostata prima in avanti e poi in indietro alternativamente di distanza 1. Non vengono creati nella posizione esatta dell'origine in modo da permettere una leggera variazione che facilita la successiva distribuzione e separazione dei punti.

La crescita degli agenti continua fino al raggiungimento di un limite massimo imposto dall'esterno a scelta (figura 6.1.1).

6.2 Contenimento su superficie

In modo da mantenere gli agenti sulla superficie di partenza ad ogni iterazione la loro posizione viene proiettata sul punto più vicino sopra la superficie, poiché i vettori di spostamento applicati agli agenti ad ogni iterazione li spostano al di fuori della superficie di partenza.

In base alla dimensione della superficie e al numero di agenti massimi consentiti scelto, non è detto che le sovrapposizioni tra gli agenti spariscano completamente; al contrario il numero di agenti viene scelto in maniera da riempire la superficie completamente, e le sovrapposizioni non verranno completamente eliminate ma distribuite in modo più possibile equo tra tutti gli agenti.



$$s = (r_1 + r_2) - d$$

$$|v| = s / 2$$

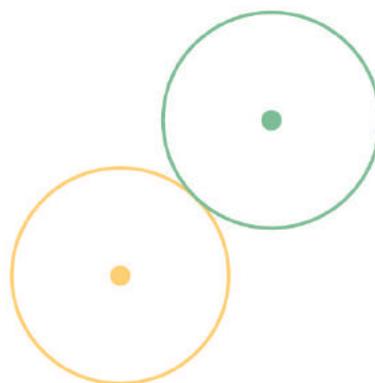


Figura 6.3.2

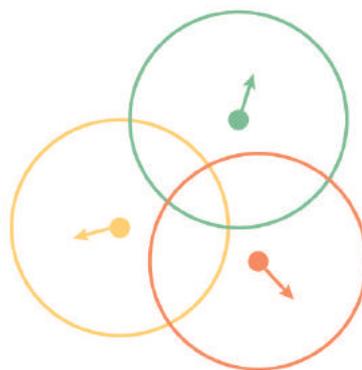
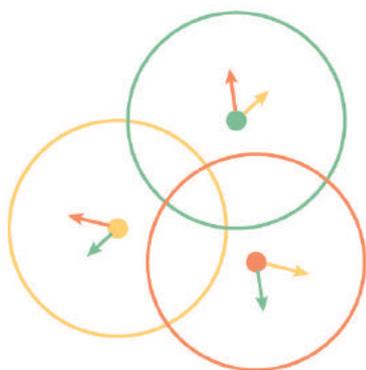


Figura 6.3.3

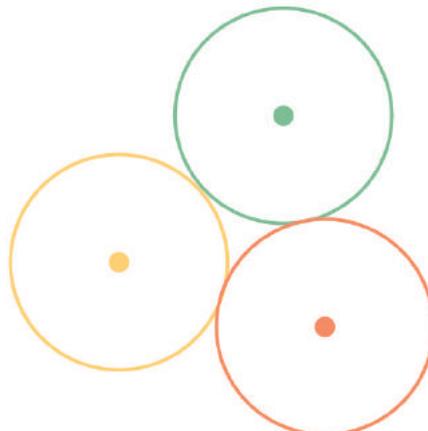
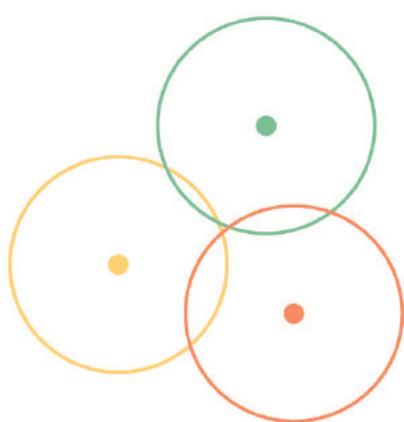
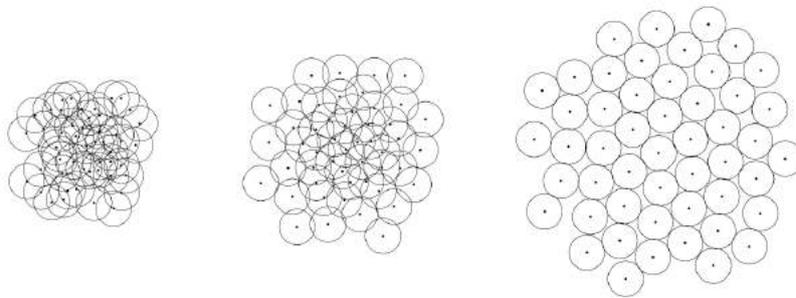


Figura 6.3.4

6.3 Circle Relaxation

La circle relaxation è un algoritmo che, dati una serie di cerchi sovrapposti fra loro, li spinge gradualmente fino a che non ci siano più sovrapposizioni. Questo avviene nel corso di più iterazioni spostando i cerchi in maniera minima ad ogni iterazione.

All'iterazione zero i cerchi si trovano nella condizione iniziale con delle sovrapposizioni tra loro, e ad ogni iterazione viene applicato un vettore di spostamento alla posizione del cerchio fino a che le sovrapposizioni spariscono completamente (Figura 6.3.1).



Questo vettore viene calcolato in base a quanto è ampia la sovrapposizione e in base al numero di cerchi che sono sovrapposti fra loro. Ad esempio, nel caso di due soli cerchi il calcolo è molto semplice. Innanzitutto, poiché i cerchi siano sovrapposti la distanza tra i due centri (d) deve essere minore della somma dei due raggi (r_1 e r_2). Se questa condizione è verificata, la distanza per cui i due cerchi si sovrappongono (s) è la somma dei due raggi al quale va sottratta la distanza tra la posizione dei due cerchi.

il vettore da applicare ad entrambi i cerchi (con verso opposto) ha perciò direzione data dalla congiungente dei centri dei due cerchi, ed il modulo dato dalla distanza per cui si sovrappongono (s) da dividere per due, in modo da spostare in maniera uguale entrambi i cerchi. Così facendo viene risolto in una sola iterazione l'algoritmo di circle relaxation per due cerchi (Figura 6.3.2).

La stessa cosa si può fare considerando un numero qualsiasi di cerchi sovrapposti: studiando i cerchi a due a due e calcolando il vettore di spostamento di solo quella coppia, che si ottiene nel metodo spiegato per solo due cerchi, è possibile calcolare la risultante dei vettori applicati ad ogni cerchio. Questa risultante è da dividere con il numero di vettori che si sommano, in modo da ottenere la media tra i vettori di spostamento ottenuti considerando le singole coppie (Figura 6.3.3). In questo modo, la sovrapposizione non si elimina in una singola iterazione ma viene ridotta in maniera uguale tra tutti i cerchi sovrapposti, e procedendo con più iterazioni si arriva fino ad avere i cerchi non più sovrapposti (Figura 6.3.4).

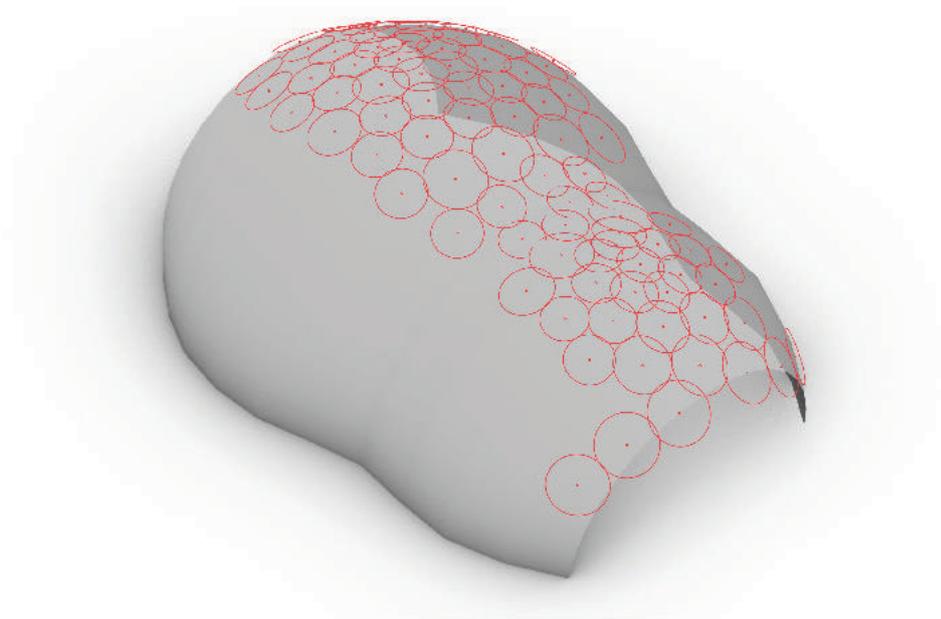
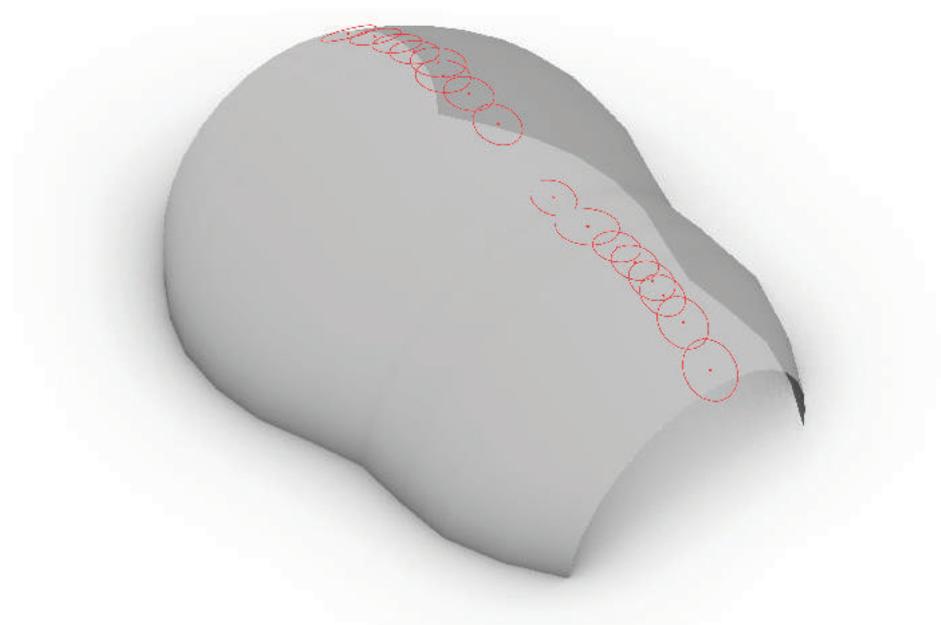
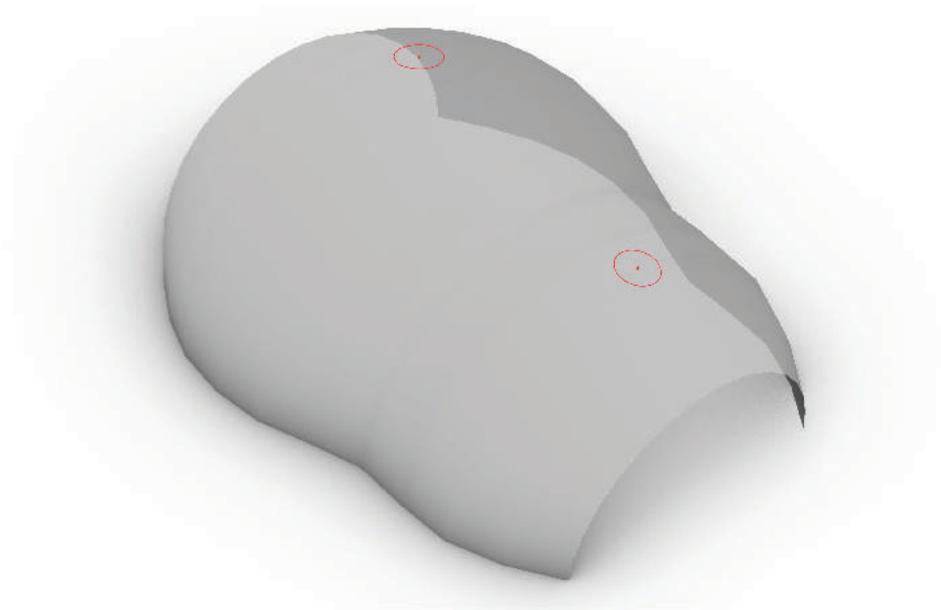


Figura 6.3.5

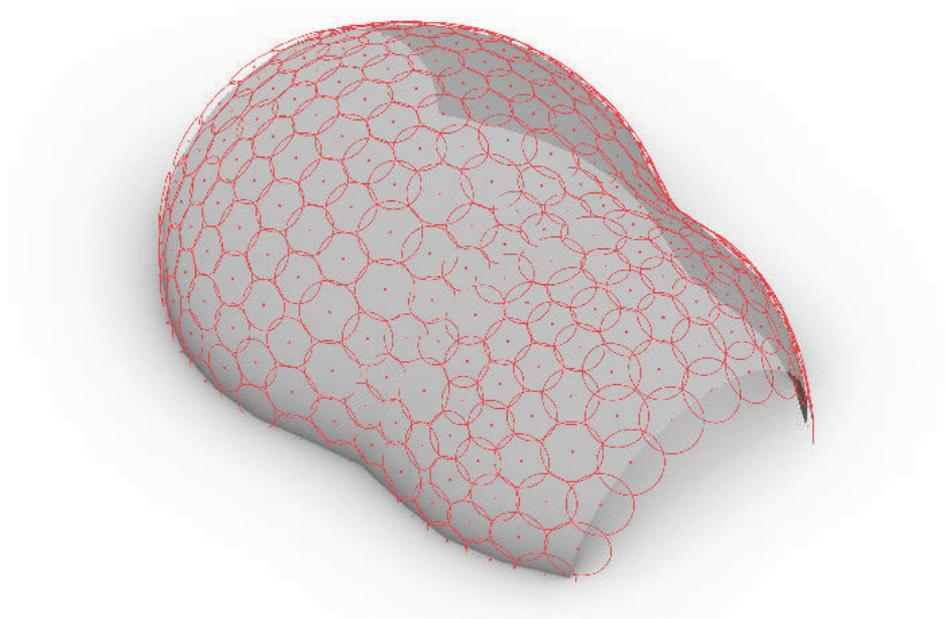
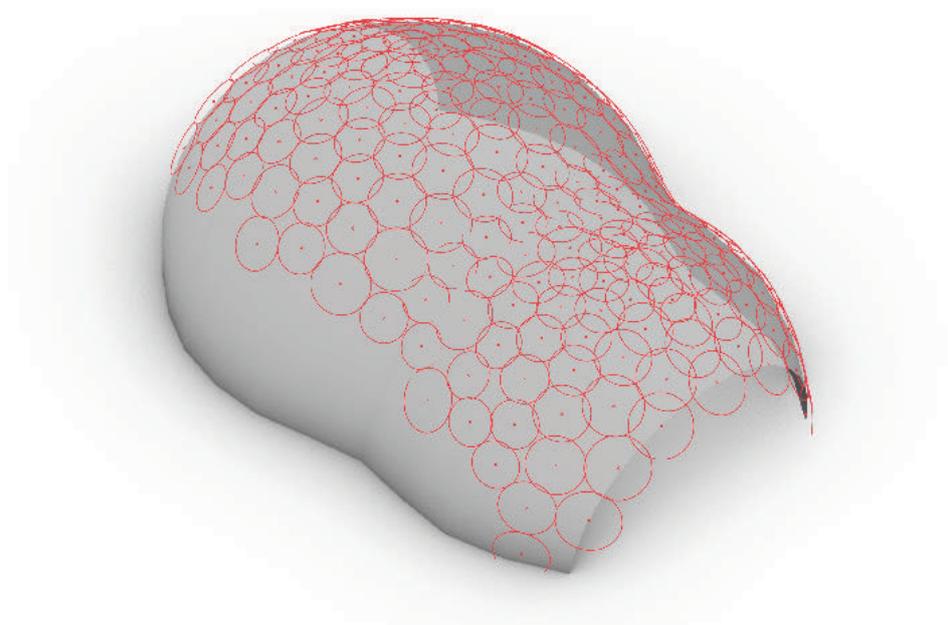
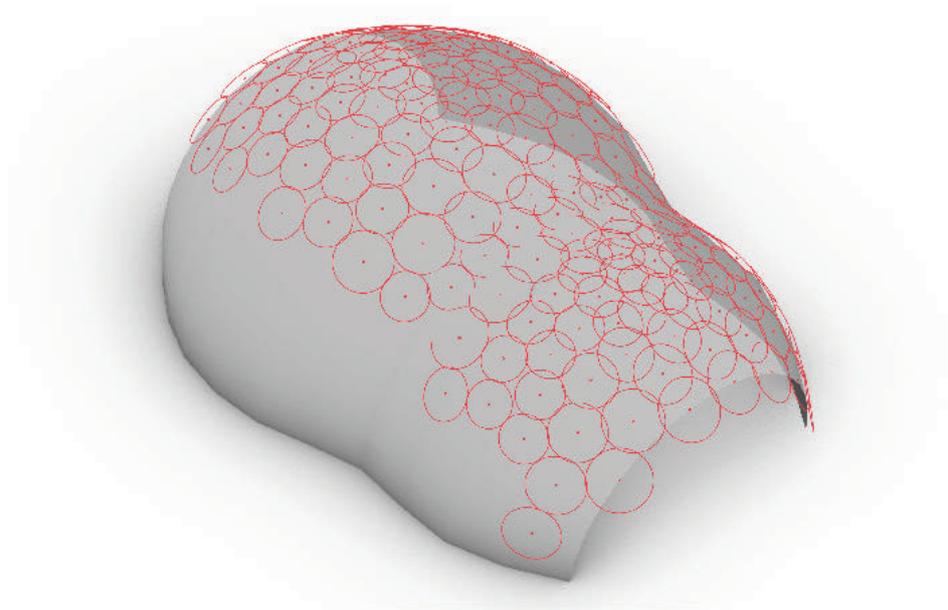


Figura 6.3.6

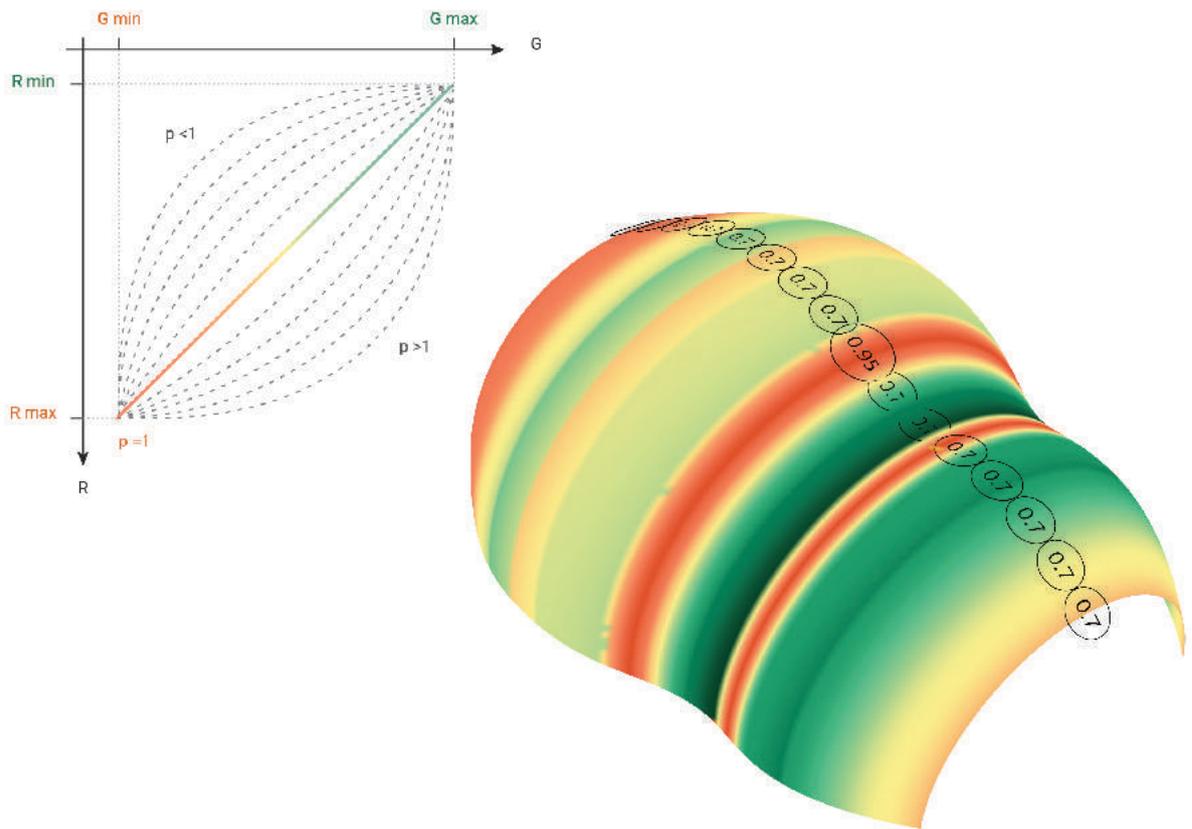


Figura 6.4.1

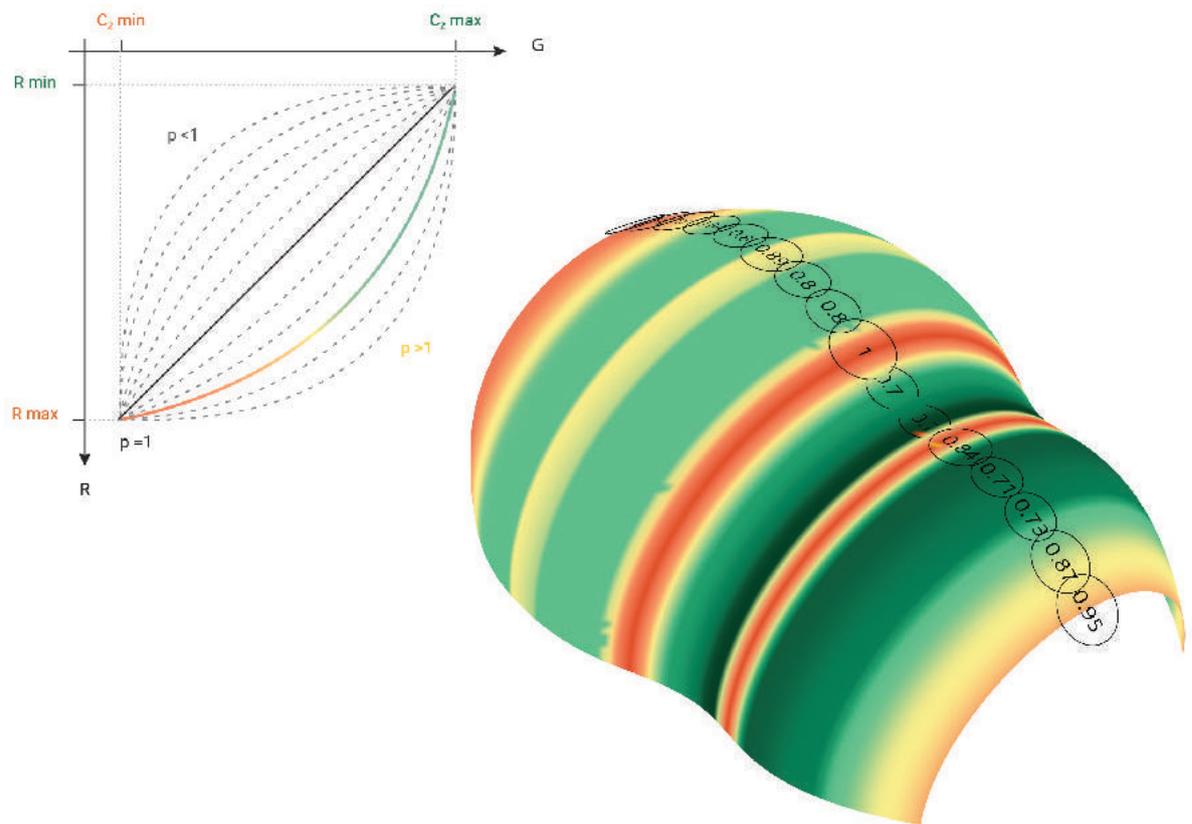


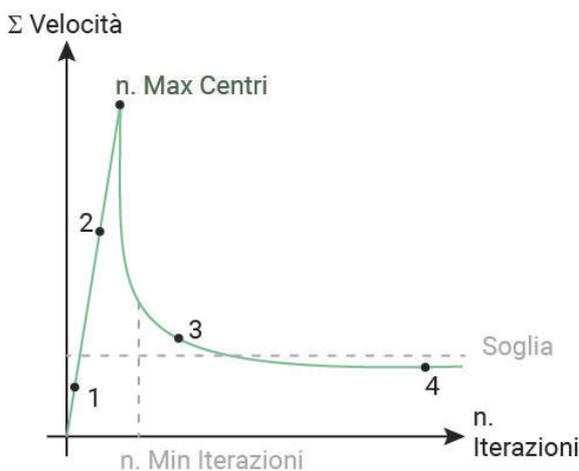
Figura 6.4.3

6.4 Campionamento di curvatura e raggio

Ogni particella è dotata di un raggio di repulsione che varia in maniera inversamente proporzionale alla curvatura gaussiana della superficie nel punto in cui si trova.

Per ottenere questo è necessario effettuare uno studio a priori della curvatura campionandola secondo delle divisioni scelte, più sono vicini i punti di campionatura migliore sarà la lettura della curvatura successiva. Una volta ottenuto un intervallo di curvatura gaussiana massima e minima, considerate in valore assoluto, viene scelto l'intervallo desiderato dei raggi, dove il raggio massimo corrisponde alla curvatura minima (zone più piatte) e il raggio minimo corrisponde alla curvatura massima, zone convesse o concave a seconda del segno di curvatura (figura 6.4.1).

Una volta stabiliti gli intervalli di curvatura e raggio, il sistema cresce dai punti di origine secondo un numero massimo di cerchi scelti, e tramite il comportamento di repulsione riempie l'intera superficie distribuendosi su di essa. Il sistema si ferma una volta raggiunta una soglia di movimento minimo dopo aver finito di crescere (figura 6.4.2).



		n. Min Iterazioni	
		<	≥
Soglia	<	1 go	4 stop
	≥	2 go	3 go

Figura 6.4.2

Dopo vari tentativi con questo prima variante del comportamento di campionamento del raggio si sceglie di modificare sia l'intervallo di curvatura, si sceglie di guardare invece che la curvatura gaussiana, la curvatura minima, poiché nel tipo di superficie studiata i punti critici si trovano quando la curvatura minima è molto minore rispetto alla curvatura massima.

Oltre a questo, si modifica la relazione tra curvatura e raggio in modo da accentuare l'effetto di variazione del raggio: si usa una proporzione con esponente > 1 . In questo modo i raggi variano con maggiore precisione alle curvatura più piccole, che hanno un ordine di grandezza molto piccolo rispetto al valore massimo, e in maniera più rapida ai valori di curvatura maggiore (figura 6.4.3).

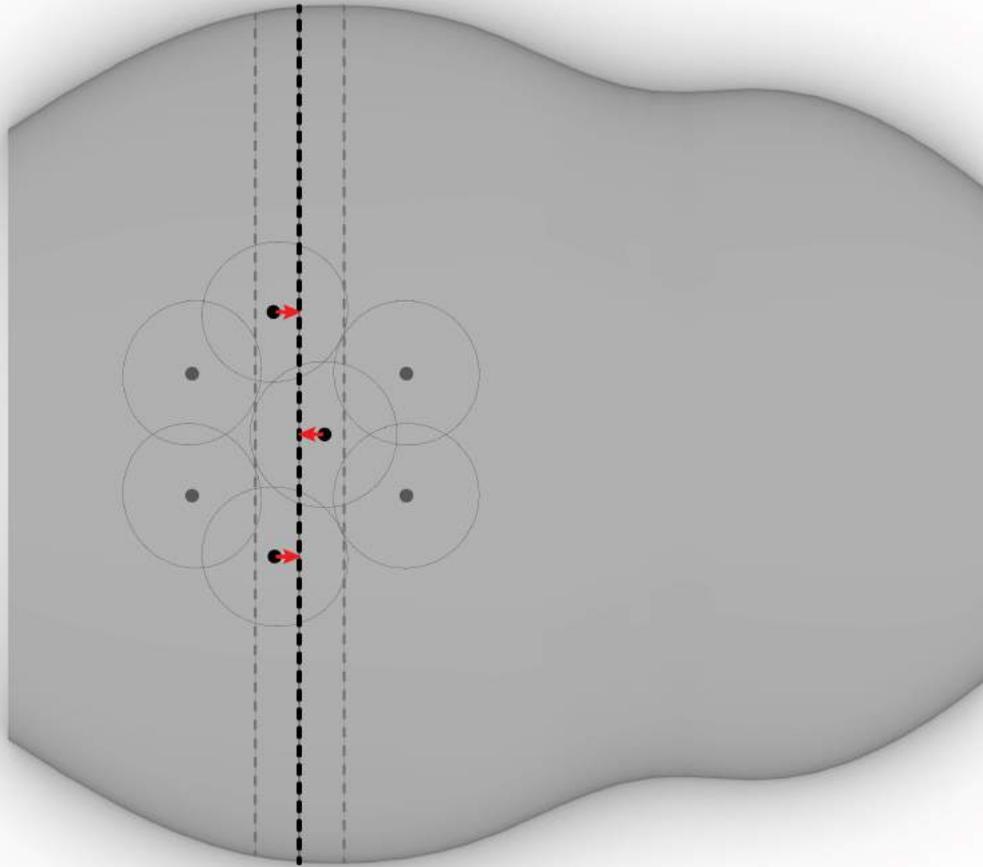


Figura 6.5.1

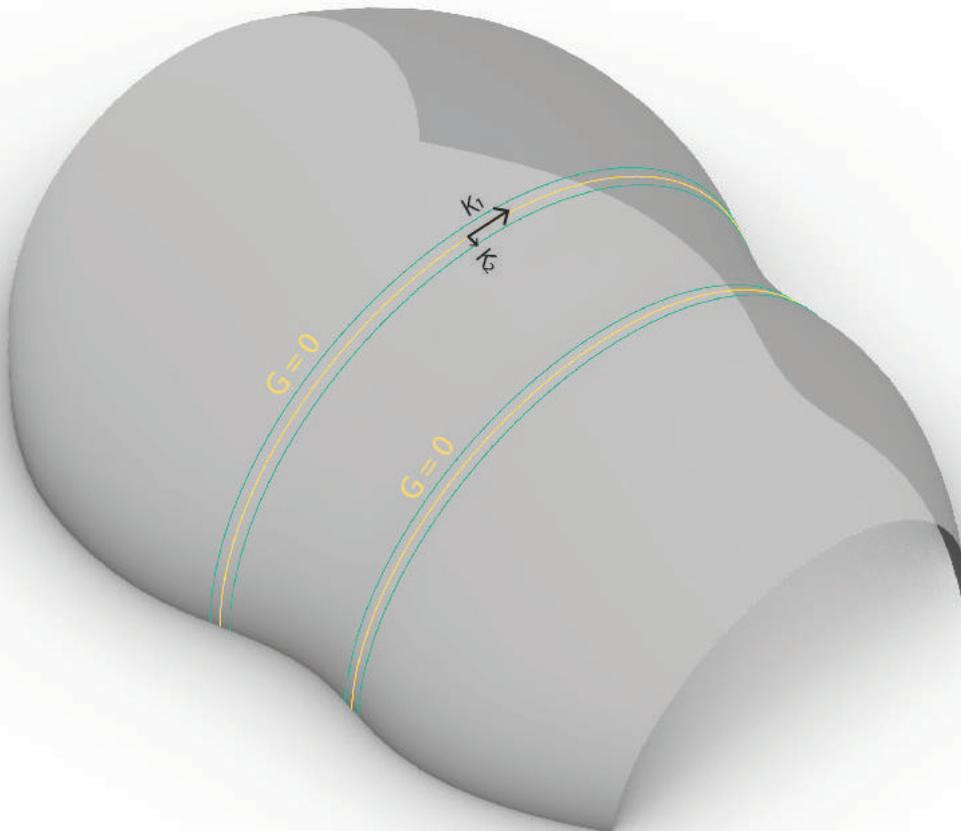


Figura 6.6.1

6.5 Allineamento

La distribuzione così ottenuta è solitamente ben ripartita sulla superficie con alcune eccezioni che si generano in base alla superficie e all'intervallo di raggi scelti. Nelle zone puramente sinclastiche o anticlastiche della superficie anche distribuzioni meno raffinate ottengono delle celle planari; al contrario, nelle zone di transizione, dove la curvatura gaussiana tende a zero, anche piccole variazioni rispetto alla distribuzione "perfetta" causano delle celle non planari o degeneri.

Per migliorare l'uniformità della distribuzione, si sceglie di inserire un comportamento di allineamento tra gli agenti rispetto ad una delle due coordinate relative alla superficie, U o V . Il comportamento si applica agli agenti che hanno delle sovrapposizioni tra loro; scegliendo ad esempio la coordinata U , si trova la coordinata U media dell'agente e gli agenti che sono entro la distanza ammessa (scelta arbitrariamente in modo da allineare solo gli agenti già abbastanza allineati tra loro) e si sposta leggermente la posizione dell'agente in quella direzione. Questo comportamento viene applicato in maniera molto lieve in modo da non sovrastare il comportamento di rilassamento (figura 6.5.1).

6.6 Evitare linea parabolica

Sempre per ovviare al problema delle zone paraboliche, ovvero in cui la curvatura gaussiana tende a zero, viene introdotto anche un altro comportamento che punta ad evitare l'agente a posizionarsi sulla curva con curvatura gaussiana nulla (Schwinn, et al., 2014).

Per ogni agente si guarda se la curvatura gaussiana dove si trova è sufficientemente vicina a zero, in quel caso si considerano i due vettori di curvatura $K1$ e $K2$, rispettivamente curvatura massima e minima, e si applica all'agente un vettore di movimento con direzione $K2$, in modo da poter spostare l'agente lontano dalla zona parabolica, con modulo proporzionale alla curvatura massima. In questo modo l'agente viene spostato oltre la zona critica di curvatura gaussiana quasi nulla.

Questo, in combinazione con un raggio sufficientemente alto che permette di evitare le zone paraboliche permette di ottenere delle celle chiuse planari anche nelle zone di transizione tra curvatura sinclastica e anticlastica (figura 6.6.1).

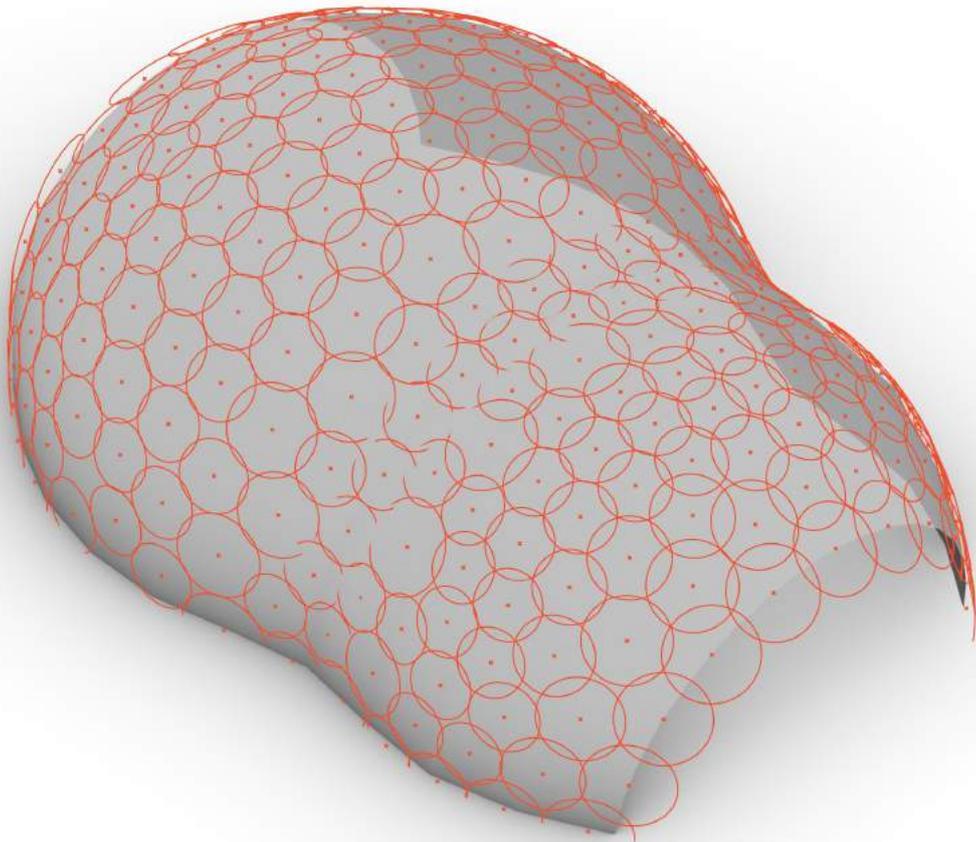


Figura 6.7.1

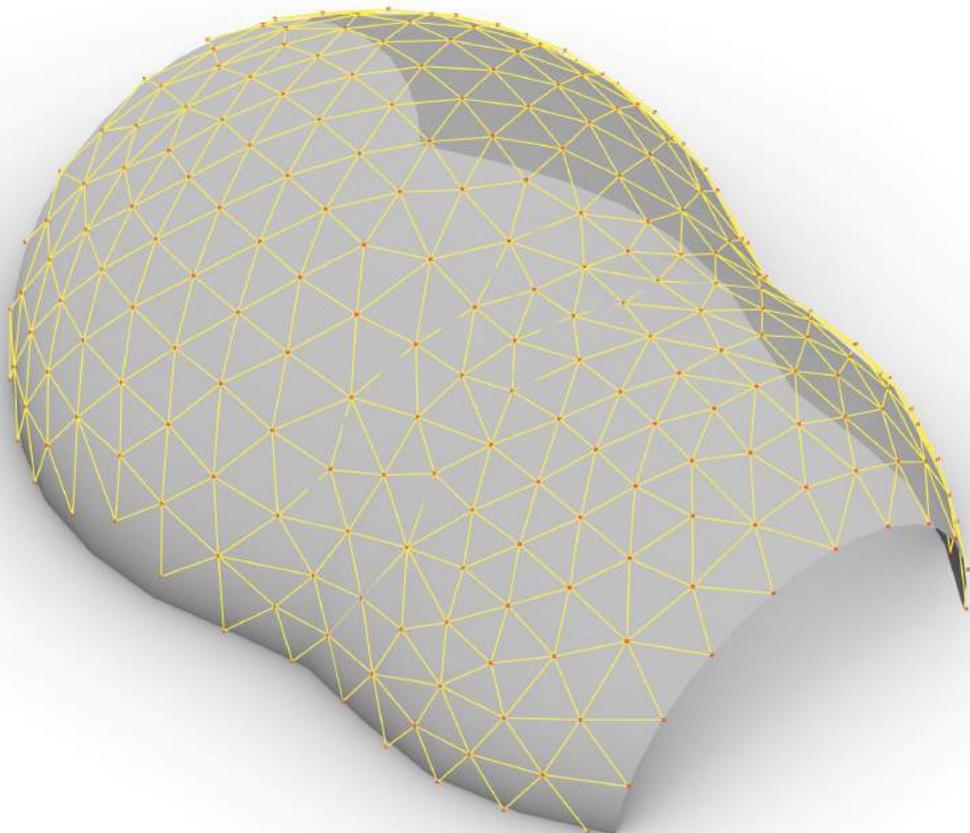


Figura 6.7.2

6.7 Generazione della topologia

Lo step successivo è quello di generare una relazione topologica tra i punti distribuiti sulla superficie e la geometria di partenza, viene creata quindi una mesh utilizzando i punti come vertici e tramite il metodo di ball pivot, ovvero collegando i punti che risultano entro un certo raggio di distanza, gli spigoli della mesh (figura 6.7.1).

Gli spigoli della mesh sono di fondamentale importanza per determinare quali vertici sono collegati tra loro in modo da poter effettuare correttamente il metodo di tangent plane intersection che genera le superfici planari desiderate (figura 6.7.2).

Le informazioni da estrapolare dalla mesh sono le posizioni dei vertici, che corrispondono alle posizioni degli agenti, i vertici collegati ad ogni vertice ed il numero di vertici collegati, ovvero se il vertice è centrale o di bordo.

7. TANGENT PLANE INTERSECTION

7.1 Tangent Plane Intersection

Gli ultimi tre decenni hanno visto una crescita in architettura di forme complesse, grazie anche alla modellazione digitale. Questo tipo di architettura è stata denominata “free form”, che in generale descrive tutte le geometrie caratterizzate da una doppia curvatura. Come detto in precedenza, le superfici a doppia curvatura non sono una novità in architettura, e presentano spesso maggiore rigidità strutturale.

Tuttavia, le superfici a doppia curvatura presentano un'elevata complessità di realizzazione, in primo luogo perché non permettono la ripetizione di elementi uguali, e in secondo perché gli elementi curvi sono difficili da fabbricare (Mesnil, 2017). Mentre un elemento a singola curvatura è possibile realizzarlo in vetro o metallo tramite estrusione, la doppia curvatura richiede l'utilizzo di stampi, che è un processo generalmente molto costoso. Per questo motivo, l'utilizzo di elementi planari è più semplice e più economico.



Figura 7.1.1 - Fiera di Milano Rho-Pero, Studio Fuksas.

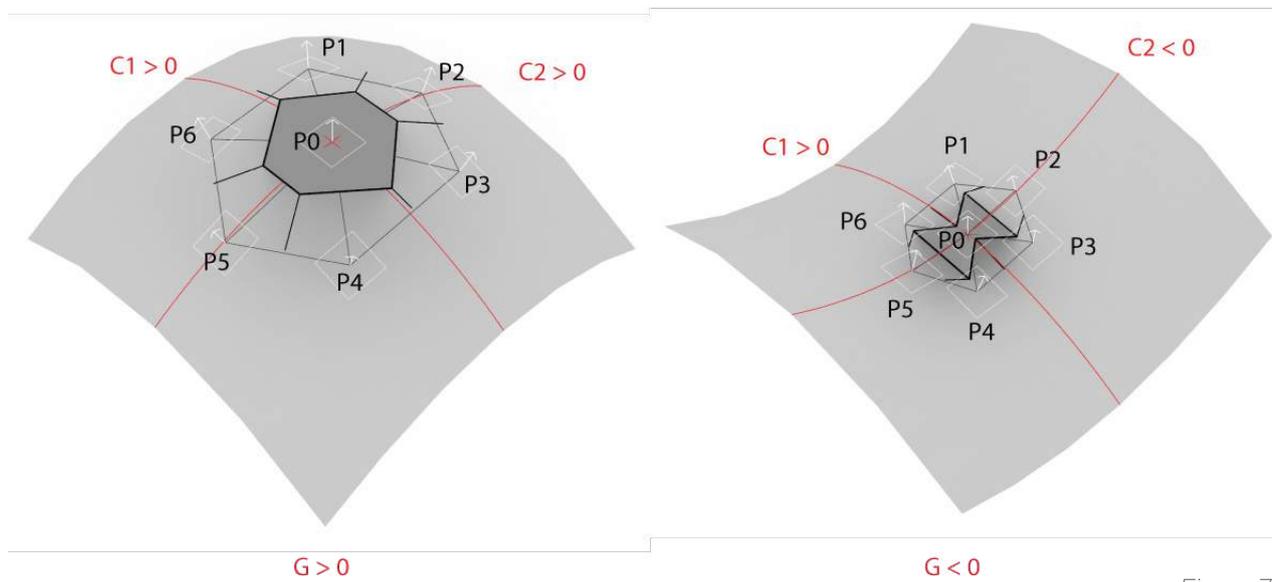


Figura 7.1.2

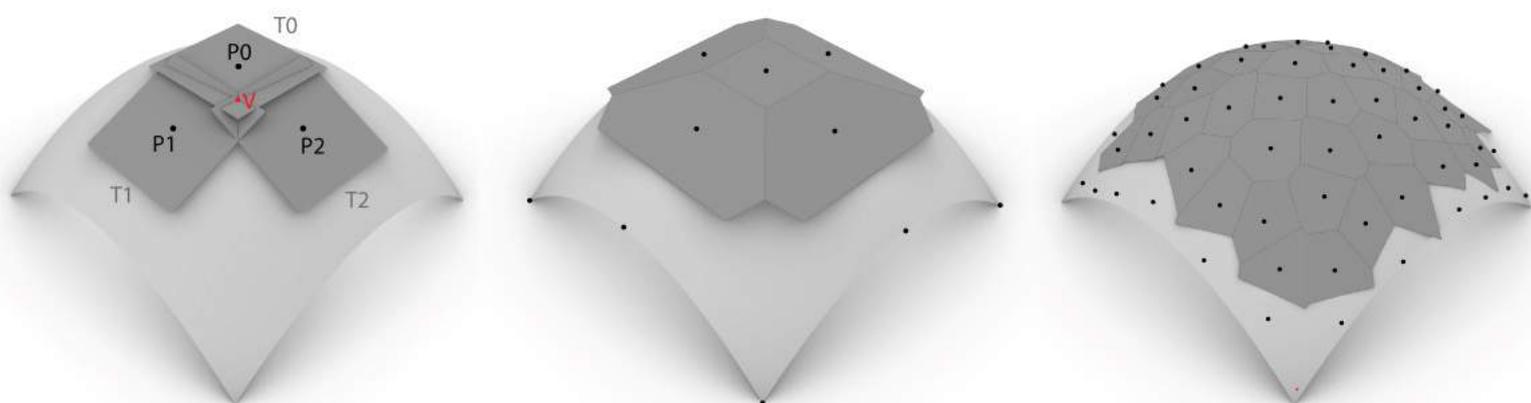


Figura 7.1.3

Il metodo più veloce di trasformare una superficie continua in pannelli piani è la triangolazione, ovvero di convertire la superficie in una mesh a facce triangolari. Questo approccio è infatti molto utilizzato come ad esempio nella Fiera di Milano dello studio Fuksas (figura 7.1.1). In questo modo i pannelli hanno quasi sempre dimensioni simili, tuttavia, il numero molto elevato di spigoli genera una geometria molto complessa che necessita di molto materiale portante e un numero di nodi elevati con solitamente sei elementi che si congiungono per nodo. Inoltre, dal punto di vista estetico i parametri che possono essere influenzati sono la dimensione e le proporzioni del triangolo, che rimangono circa costanti (Stavric, et al., 2014).

Un altro metodo è quello di suddividere la superficie in poligoni quadrangolari, che sono dal punto di vista sia strutturale che di realizzazione dei nodi più ottimali; ma questo metodo non è facilmente sfruttabile con superfici arbitrarie.

Infine, un altro metodo è quello di discretizzare la superficie con poligoni planari, la costruzione si basa sull'intersezione dei piani tangenti ai punti della superficie. Più è uniforme la distribuzione di punti sulla superficie più il risultato ottenuto realizza dei pannelli esagonali a nido d'alveare nel caso di superfici con curvatura positiva (concava) e a sella in superfici con curvatura negativa (convessa). Questo metodo è definito come *tangent plane intersection* (figura 7.1.2).

Si considerano una serie di punti distribuiti su una superficie a doppia curvatura, per ogni punto si considera il piano tangente alla superficie in quel punto. Questo piano viene intersecato con i piani tangenti dei punti adiacenti (figura 7.1.3).

La scelta dei punti adiacenti viene fatta in base alla mesh ottenuta tramite ball pivot, ovvero i punti connessi da uno spigolo sono considerati come adiacenti. I tre piani che si intersecano sono quelli corrispondenti ai tre vertici di una faccia della mesh, che appunto sono connessi tra loro. L'intersezione di due piani genera uno spigolo che se intersecato a sua volta con il terzo piano genera un vertice che definisce il limite del pannello sul piano. Ripetendo quest'operazione per tutti i punti collegati si ottengono tutti i vertici che per definizione stanno sul piano iniziale, per cui il poligono di contorno sarà per forza planare (Stavric & Wiltsche, 2011).

Questo metodo garantisce quindi poligoni con più o meno lati a seconda della distribuzione iniziale scelta e permette quindi di ottenere nodi con meno elementi collegati rispetto alla triangolazione. In base alla superficie e alla distribuzione di punti si possono ottenere risultati espressivamente molto diversi.

In ogni caso questo metodo funziona al meglio per distribuzioni molto uniformi e per curvature lontane dallo zero. Infatti, in zone più "piatte" o per superfici con un cambio di curvatura si generano delle zone critiche in cui si ha il fallimento del sistema e non si riesce a generare una superficie planare che sia contenuta nella superficie di partenza. Analogamente per distribuzioni molto disuniformi di punti il sistema tende a fallire.

Control Points

- 0 - 5.00
- 1 - 11.50
- 2 - 14.00
- 3 - 15.00
- 4 - 14.00
- 5 - 11.50
- 6 - 5.00

Origins

U1 = 0.50, V1 = 0.10
U2 = 0.50, V1 = 0.90

N. Cells

286

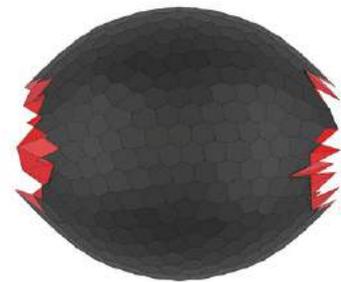
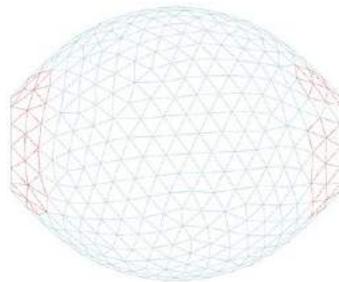
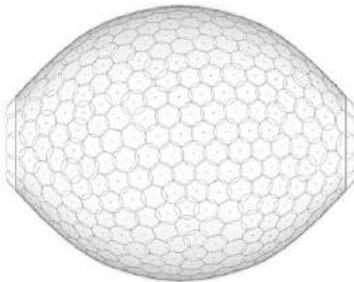
Curvature

G min = 0.001384



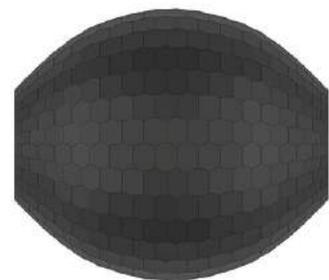
Radius

R min = 1.25



Diagrid Structure

U Divisions = 35
V Divisions = 15
Type = False
Number Nodes = 288



7.2 Applicazione

Per verificare la stabilità del metodo della Tangent Plane Intersection sono state effettuate diverse prove con la prima iterazione del comportamento di distribuzione sulla superficie (senza considerare i comportamenti per evitare le eccezioni create di allineamento sulla coordinata U e di allontanamento dalle zone paraboliche) su una serie di superfici diverse: da superfici puramente sinclastiche od anticlastiche, fino a superfici con uno o due passaggi. Lo studio viene fatto scegliendo una variazione dell'intervallo dei raggi e del numero di centri in modo da confrontare i risultati ottenuti tra loro. Da queste prove si nota come è già stato riportato che il metodo ha dei problemi principalmente nelle zone paraboliche, in cui la curvatura gaussiana tende a zero.

È stato poi riportato, usando le stesse superfici, il metodo della TPI utilizzando invece che la distribuzione ottenuta tramite il sistema di agenti, una distribuzione ideale che suddivide la superficie per le coordinate U e V per un numero definito a scelta. In questo modo i punti sono distribuiti in maniera "perfetta" ma non determinata dalla curvatura. Così facendo si nota come in alcune distribuzioni, le eccezioni non sono più presenti, e in quelle in cui le eccezioni persistono, cambiare il numero di suddivisioni in maniera tale da evitare le zone paraboliche risolve le celle sovrapposte.

Da qui si nota come la distribuzione per funzionare al meglio deve disporsi in maniera più possibile ordinata; prevalentemente nelle zone che creano problemi, ovvero quelle paraboliche, che constatano il passaggio da zone sinclastiche ad anticlastiche, nelle quali anche una distribuzione più variata non crea grossi problemi.

Control Points

- 0 - 5.00
- 1 - 10.00
- 2 - 11.00
- 3 - 10.00
- 4 - 8.50
- 5 - 7.50
- 6 - 8.00

Origins

U1 = 0.50, V1 = 0.00
U2 = 0.50, V1 = 0.63

N. Cells

352

Curvature

G min = 0.000063



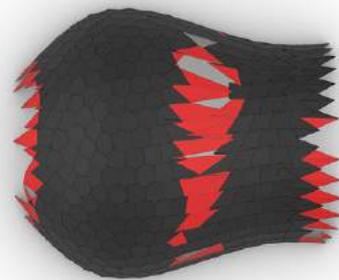
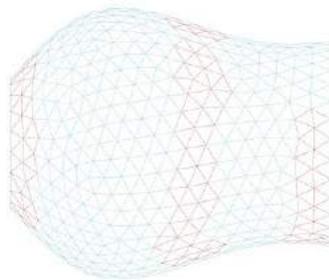
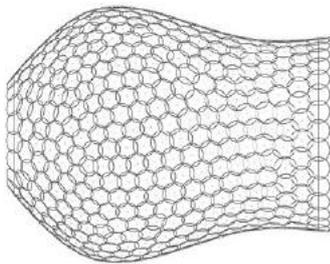
G max = 0.0018007

Radius

R min = 0.80

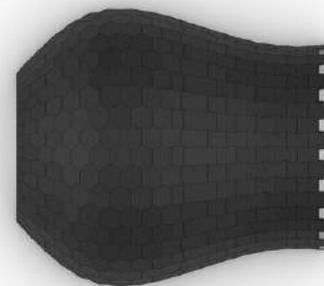
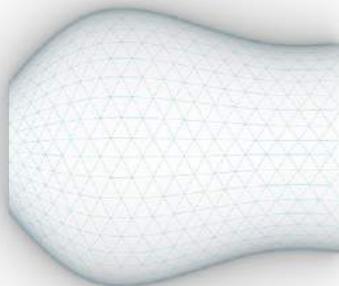


R max = 1.00



Diagrid Structure

U Divisions = 34
V Divisions = 19
Type = False
Number Nodes = 350



Control Points

- 0 - 6.00
- 1 - 8.50
- 2 - 9.35
- 3 - 9.25
- 4 - 7.10
- 5 - 8.50
- 6 - 5.00

Origins

U1 = 0.50, V1 = 0.05
U2 = 0.50, V1 = 0.95

N. Cells

192

Curvature

G min = 0.0008183



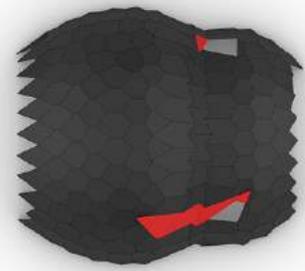
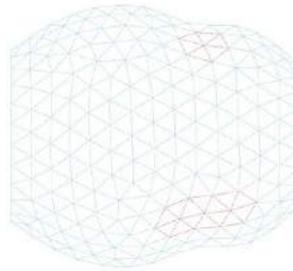
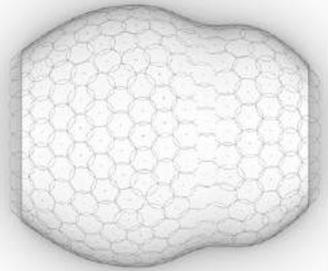
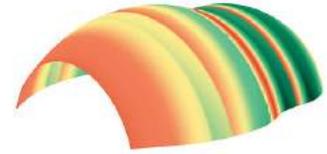
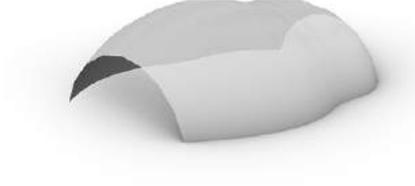
G max = 0.0272898

Radius

R min = 1.00

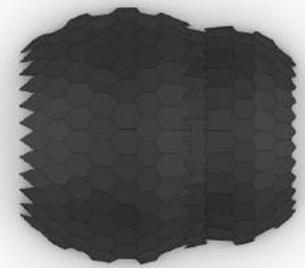
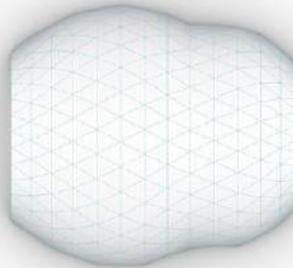


R max = 1.20



Diagrid Structure

U Divisions = 34
V Divisions = 19
Type = False
Number Nodes = 350



Control Points

- 0 - 3.15
- 1 - 2.50
- 2 - 6.00
- 3 - 7.50
- 4 - 8.50
- 5 - 7.50
- 6 - 5.50

Origins

U1 = 0.50, V1 = 0.22
U2 = 0.50, V1 = 0.71

N. Cells

232

Curvature

G min = 0.0010768



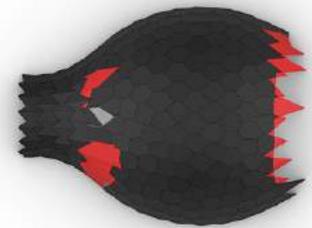
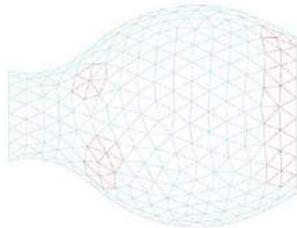
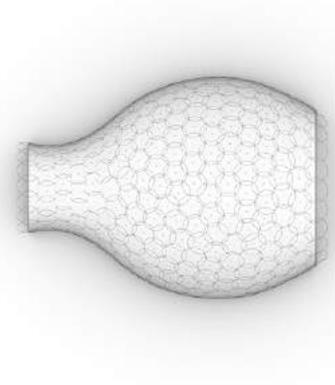
G max = 0.0572776

Radius

R min = 0.80

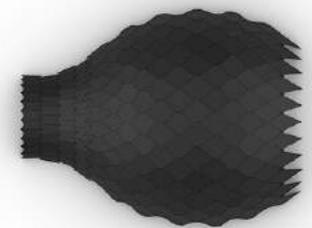
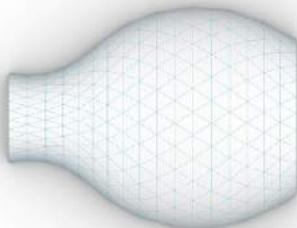


R max = 0.8



Diagrid Structure

U Divisions = 17
V Divisions = 25
Type = False
Number Nodes = 234



Control Points

- 0 - 6.00
- 1 - 8.00
- 2 - 6.50
- 3 - 5.35
- 4 - 6.50
- 5 - 8.00
- 6 - 6.00

Origins

U1 = 0.50, V1 = 0.00
U2 = 0.50, V1 = 1.00

N. Cells

202

Curvature

G min = 0.0019597



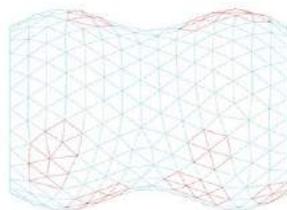
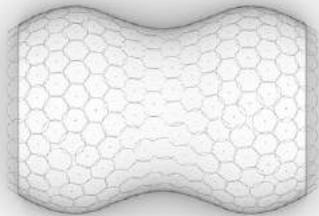
G max = 0.0369527

Radius

R min = 0.90

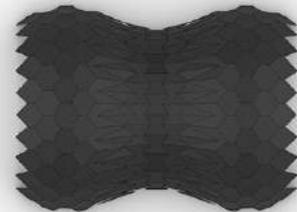
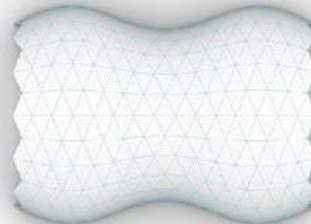


R max = 0.90



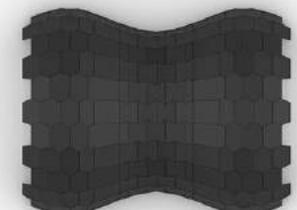
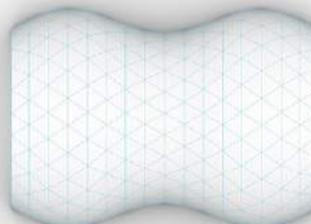
Diagrid Structure

U Divisions = 17
V Divisions = 24
Type = False
Number Nodes = 204



Diagrid Structure

U Divisions = 30
V Divisions = 12
Type = False
Number Nodes = 202



Control Points

- 0 - 11.00
- 1 - 8.50
- 2 - 7.25
- 3 - 6.75
- 4 - 7.25
- 5 - 8.50
- 6 - 11.00

Origins

U1 = 0.50, V1 = 0.40
U2 = 0.50, V1 = 0.63

N. Cells

302

Curvature

G min = 0.0009600



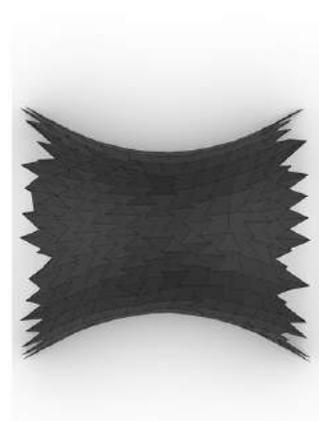
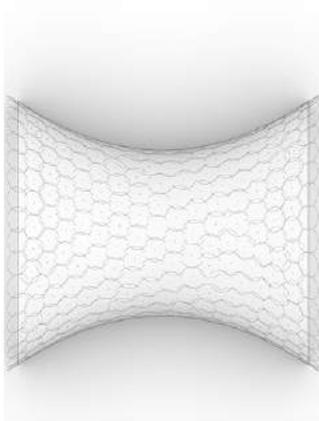
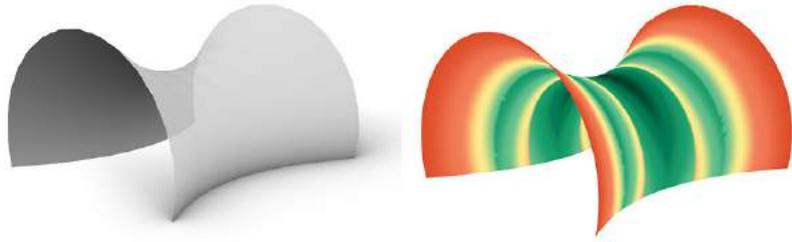
G max = 0.0113608

Radius

R min = 1.10

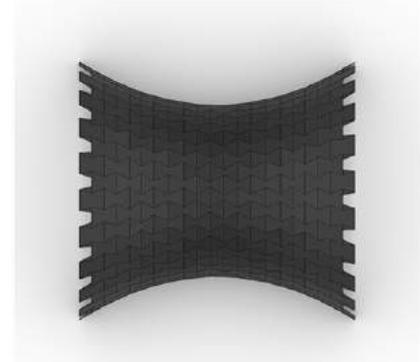
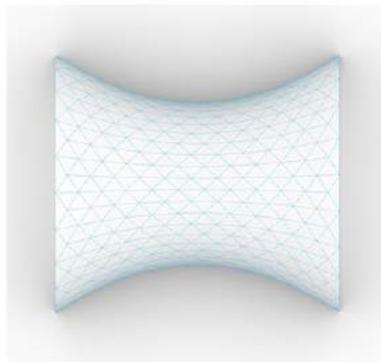


R max = 1.10



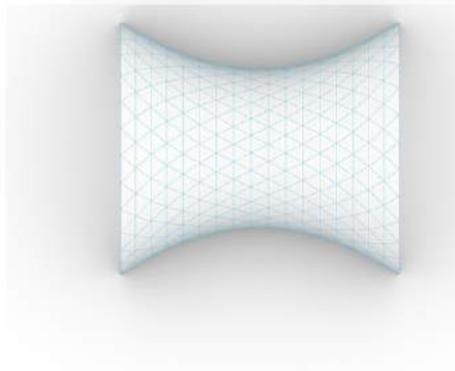
Diagrid Structure

U Divisions = 17
V Divisions = 33
Type = False
Number Nodes = 306



Diagrid Structure

U Divisions = 23
V Divisions = 25
Type = False
Number Nodes = 312



Control Points

- 0 - 3.50
- 1 - 7.50
- 2 - 7.50
- 3 - 7.00
- 4 - 7.50
- 5 - 7.50
- 6 - 3.50

Origins

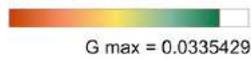
U1 = 0.05, V1 = 0.50
U2 = 0.75, V1 = 0.50

N. Cells

232

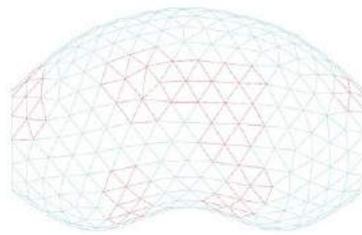
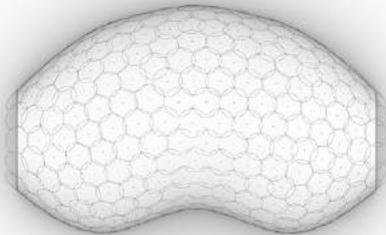
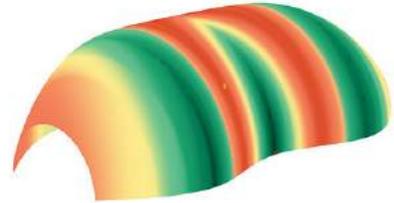
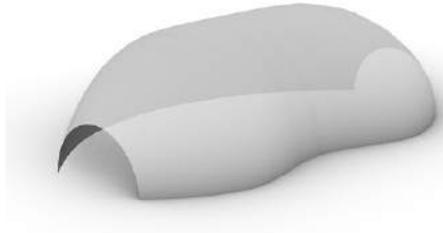
Curvature

G min = 0.0000012



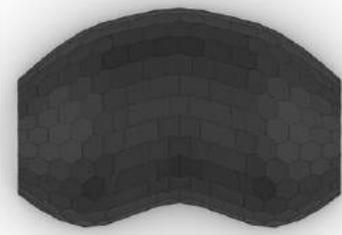
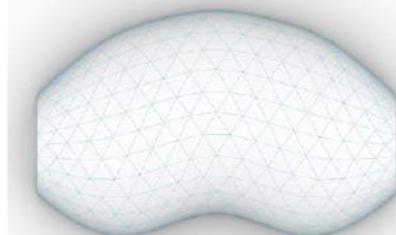
Radius

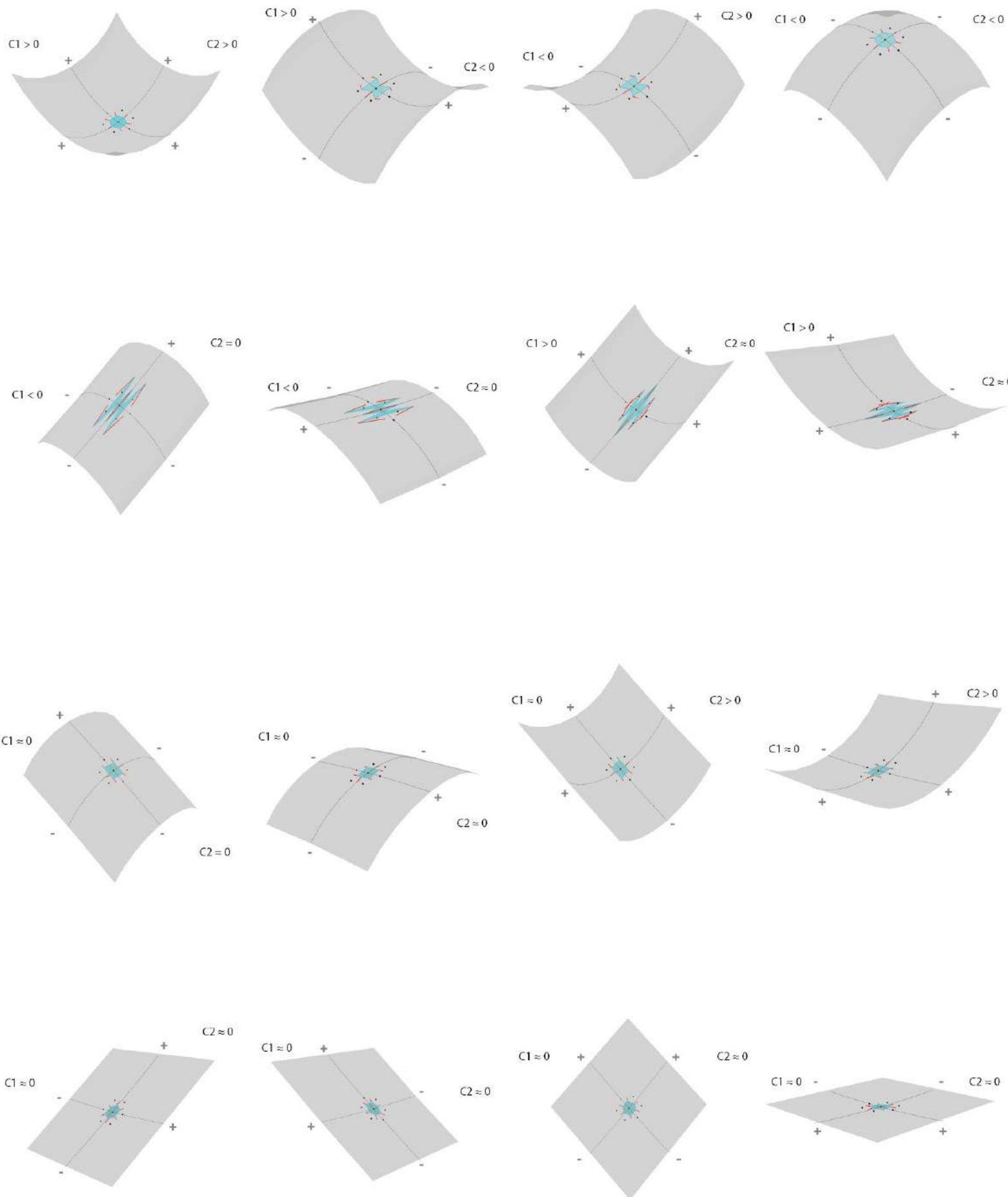
R min = 0.95



Diagrid Structure

U Divisions = 30
V Divisions = 14
Type = False
Number Nodes = 233



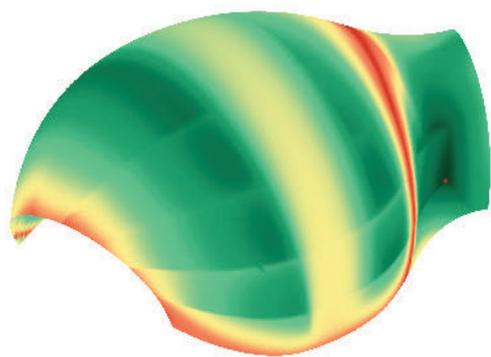
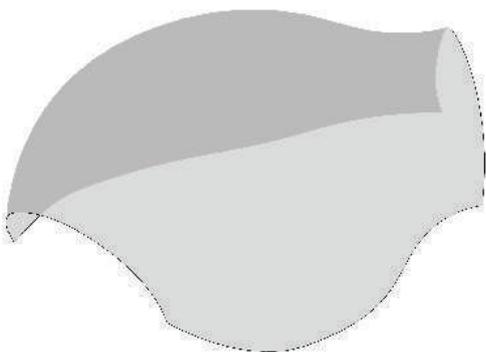
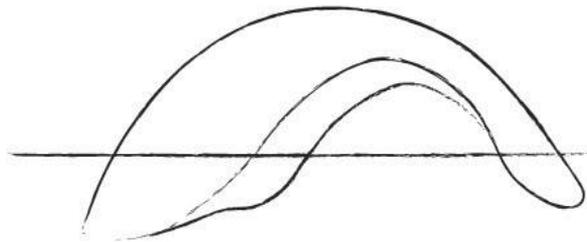
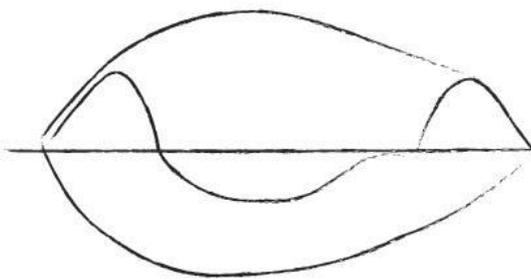
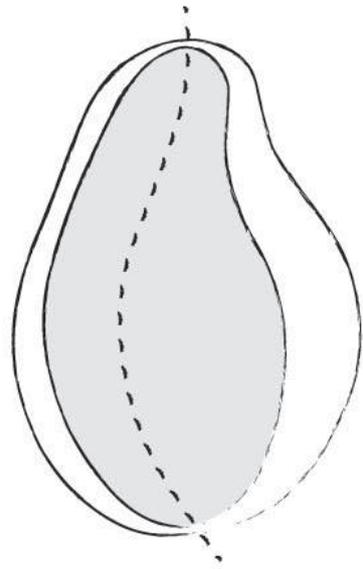
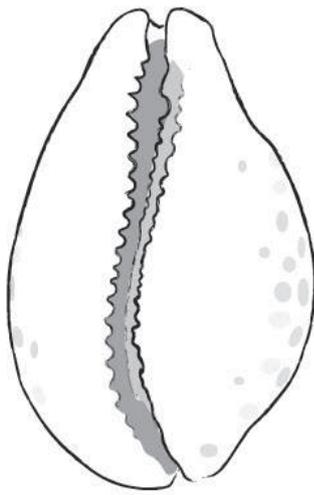


7.3 Studio casistica possibile

Viene svolto poi uno studio a priori della casistica possibile della zona di superficie in cui si trova il punto e i suoi vicini, per determinare in quali casi si verifica la presenza di eccezioni al metodo della TPI; ovvero dove i vertici trovati creano una cella non planare oppure che creano dei poligoni degeneri. Un poligono viene considerato degenero se i suoi vertici vengono trovati in posizioni molto distanti dai punti iniziali e/o si creano sovrapposizioni all'interno della cella.

Considerando una distribuzione perfetta esagonale, si nota come la distribuzione varia in base all'orientamento dell'esagono; poiché questo incide sul campionamento della curvatura che, soprattutto nelle zone di curvatura molto bassa, si confronta con la curvatura dei punti vicini. I casi di superfici puramente sinclastiche ed anticlastiche sono i casi già noti, e la rotazione dell'esagono cambia l'orientamento della cella risultante, ma non crea dei poligoni degeneri.

I casi in cui si verificano poligoni degeneri sono quelli in cui una delle due curvature tende a zero, ovvero nelle zone paraboliche. Si nota come l'intersezione dei piani si trova in punti distanti dai vertici dell'esagono, che inoltre creano delle sovrapposizioni. Tuttavia, nel caso di rotazione dell'esagono, (non più allineato con la punta alla curvatura maggiore, ma a quella minore) il poligono non risulta più degenero. Questo è attribuibile al fatto che in questo caso la curvatura minore, che tende a zero, viene campionata solo tre volte, al posto di cinque, creando delle celle ancora valide. Infine, si nota come nel caso in cui entrambe le curvature siano molto basse, tendenti a zero ma la superficie non è ancora perfettamente piana, le celle si creano senza problemi, poiché non ci si trova in una zona parabolica ma le due curvature hanno valori relativamente vicini, per cui il risultato è analogo ad una superficie sinclastica o anticlastica.



7.4 Gestione delle eccezioni

Successivamente, vengono implementati dei comportamenti appositi per migliorare i risultati della *Tangent Plane Intersection* nelle zone paraboliche. Come è già stato illustrato i comportamenti scelti puntano ad evitare le zone paraboliche, dove la curvatura gaussiana tende a zero e ad allineare gli agenti secondo la coordinata U per ottenere una distribuzione più uniforme.

Tuttavia, come è stato riprovato non sempre questo metodo funziona correttamente anche per distribuzioni “perfette”. Perciò lo studio a priori della superficie per verificare che sia adatta è essenziale. I criteri da tenere a mente sono:

- mantenere un passaggio da zone sinclastiche ad anticlastiche “morbido” perché la distribuzione abbia spazio per variare appropriatamente i raggi dal minore al maggiore.
- Il raggio massimo, nelle zone a curvatura minima, deve essere preso sufficientemente alto in modo da evitare punti con intersezioni molto lontane dal centro, che creano poligoni degeneri

La superficie scelta è stata quindi modellata tenendo a mente questi principi e traendo ispirazione dalla geometria delle cipree, che hanno una superficie principalmente concava con dei cambi di curvatura morbidi (figura 7.4.1).

8. SISTEMA COSTRUTTIVO

8.1 Design for disassembly

Il concetto di Design for Disassembly (Guy & Ciarimboli, 2008) è quello di progettare architetture che riducano il consumo di nuovi materiali e gli sprechi creati nelle fasi di costruzione, rinnovo e demolizione. puntando invece a un'architettura che permetta di riutilizzare componenti o materiali, in modo tale da provvedere benefici economici ed ambientali sia per coloro che realizzano la costruzione che per chi ne usufruisce. Per questo motivo non basta progettare la costruzione ma il DfD si concentra anche sul progettare la demolizione o il disassemblaggio.

Generalmente il processo di demolizione selettiva, con l'intento di recuperare e/o riciclare materiali è più dispendioso e richiede tempi maggiori rispetto alla demolizione tradizionale. Questo è dovuto principalmente alla scelta dei materiali spesso difficili da riciclare, ad esempio nel caso delle barre di acciaio per le armature del calcestruzzo, e alle tecniche di realizzazione delle connessioni, per esempio con l'utilizzo di chiodi, viti o adesivi, che rendono difficile disfare i giunti, o ancora l'utilizzo di giunti a umido, per esempio nel caso delle sezioni in calcestruzzo o nel caso dei giunti di malta per le strutture in mattoni (figura 8.1.1).

Il primo principio fondamentale del DfD è quindi quello di scegliere materiali considerando l'impatto futuro che avranno, la possibilità che hanno di essere riutilizzati oppure di essere riciclati e se il livello di qualità iniziale verrà mantenuto nel tempo.

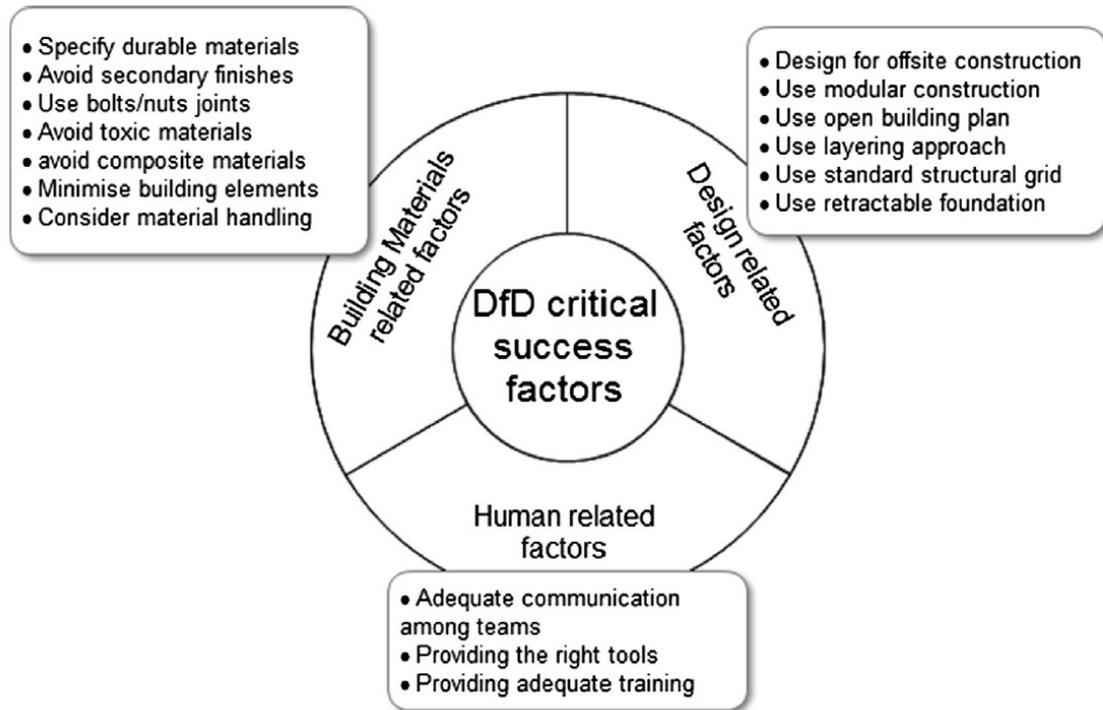


Figura 8.1.1 - Akinade, et Al., 2017.

Type of Connection	Advantages	Disadvantages
Screw	easily removable	limited reuse of both hole and screws cost
Bolt	strong can be reused a number of times	can seize up, making removal difficult cost
Nail	speed of construction cost	difficult to remove removal usually destroys a key area of element - ends
Friction	keeps construction element whole during removal	relatively undeveloped type of connection structural weakness
Mortar	can be made to variety of strengths	mostly cannot be reused, unless clay strength of mix often over-specified making it difficult to separate bonded layers
Adhesives	strong and efficient deal with awkward joints variety of strengths	virtually impossible to separate bonded layers cannot be easily recycled or reused
Rivet	speed of construction	difficult to remove without destroying a key area of element - ends

Figura 8.1.2 - Guy & Clarimboli, 2008.

Un altro principio indispensabile è concepire le connessioni tali da essere accessibili e reversibili; questo implica eliminare connessioni basate su reazioni chimiche, quali leganti, sigillanti e colle, e cercare di utilizzare il più possibile connessioni meccaniche, come viti, bulloni e chiodi oppure come i giunti a secco (figura 8.1.2).

Un'altra componente che comporta maggiori difficoltà nella demolizione selettiva sono le finiture, che spesso si basano sulla sovrapposizione di vari strati (sovrapposti o verniciati) che incapsulano la struttura sottostante. Per questo una strategia da seguire è quella di cercare di mantenere indipendenti e separate le varie componenti di una costruzione.

È quindi importante cercare di mantenere indipendenti i sistemi, che sono caratterizzati da cicli di vita di durata differente, in modo tale da permettere una più facile separazione delle componenti e dei materiali per effettuare riparazioni, sostituzioni e per permettere di disassemblarli in maniera indipendente.

Tenendo a mente questi principi si sceglie il legno come materiale principale per i seguenti motivi:

- Permette l'utilizzo di sole connessioni meccaniche, sia per attrito o giunti a secco, che tramite componenti metallici (viti, chiodi, ecc.);
- È un materiale leggero che permette di effettuare il processo di montaggio/smontaggio velocemente.



Figura 8.2.1 - Travi lamellari. Pfeifer Holding GMBH, Uwe Muhlhauser.



Figura 8.2.2 - Pannelli Multistrato Pfeifer Holding GMBH, Uwe Muhlhauser.

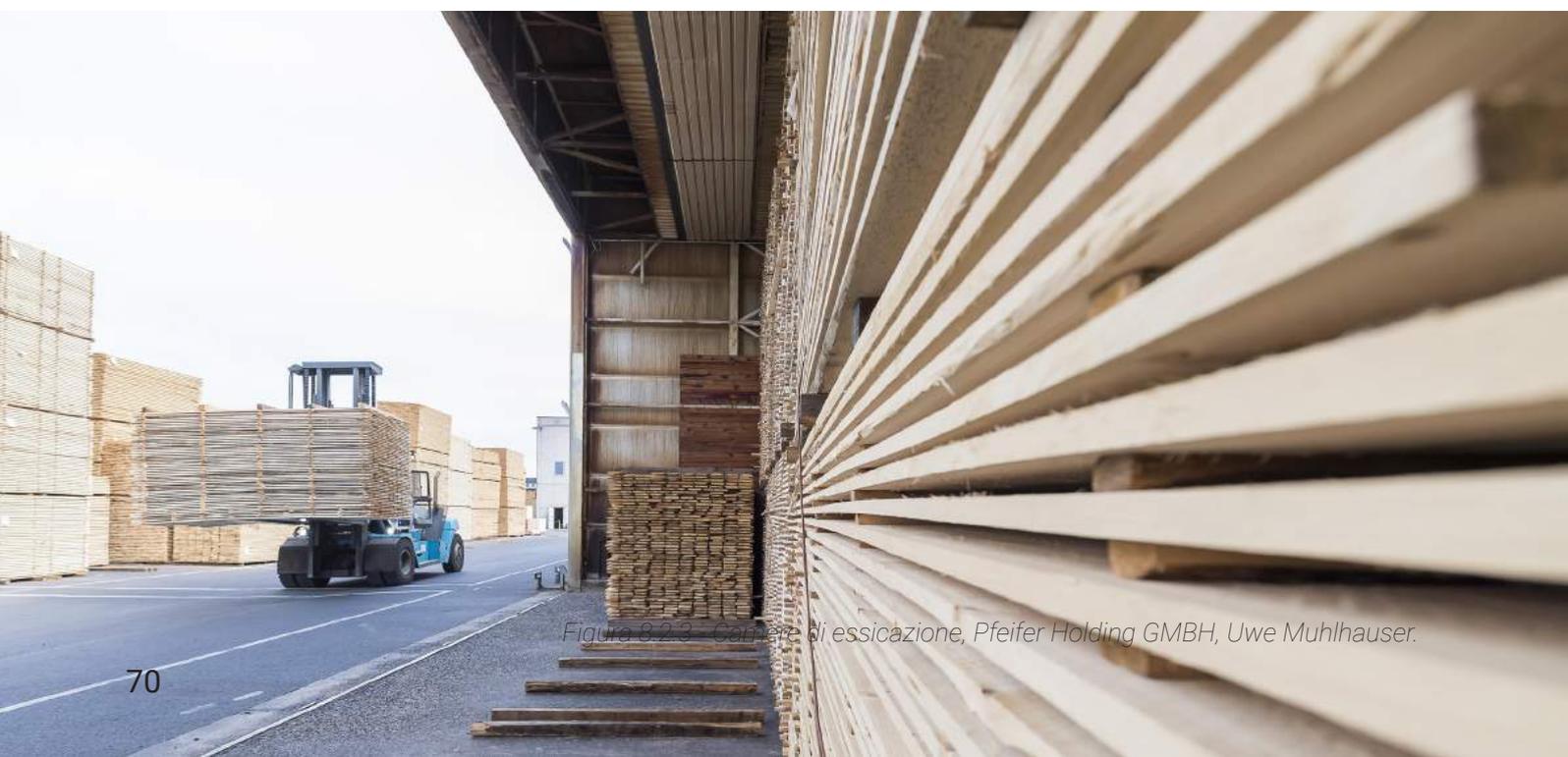


Figura 8.2.3 - Camere di essiccazione, Pfeifer Holding GMBH, Uwe Muhlhauser.

8.2 Legno

Viene scelto di sviluppare il sistema costruttivo in legno, date le sue proprietà quali un alto rapporto prestazioni/peso e la facilità di lavorazione. Il legno è un materiale che negli ultimi anni ha visto un ritorno alla popolarità come materiale strutturale, data la maggiore sensibilità che si va sviluppando per i temi di inquinamento e conservazione ambientale. Infatti, il settore delle costruzioni rimane ad ora dominato dalla presenza di cemento ed acciaio che tuttavia, come visto precedentemente, rappresentano combinati più della metà delle emissioni di CO₂ dirette nei settori industriali.

Il legno permette di ridurre la carbon footprint di un edificio in quanto fa parte di una filiera produttiva che richiede meno energia rispetto a materiali quali cemento, acciaio o alluminio; inoltre, grazie alla possibilità di riciclo e riutilizzo alla fine del suo ciclo di vita, il legno si considera solitamente carbon neutral.

Per cui come materiale costruttivo il legno, se raccolto entro limiti sostenibili, grazie alla filiera produttiva meno intensiva a livello di energia, assieme all'effetto di stoccaggio di CO₂ delle foreste all'inizio del ciclo di vita del prodotto, porta ad una maggiore possibilità di mitigazione delle emissioni complessive dell'edificio rispetto ad una struttura tradizionale. (Amiri, et al., 2020).

Si sceglie di utilizzare il legno lamellare incollato, classificato secondo le norme europee EN 14080 e EN1194, GL28h, dove GL indica Glued Laminated Timber.



Figura 8.3.1 - LAGA fabbricazione del pannello. Development Process images by ICD/ITKE/IIGS University of Stuttgart.

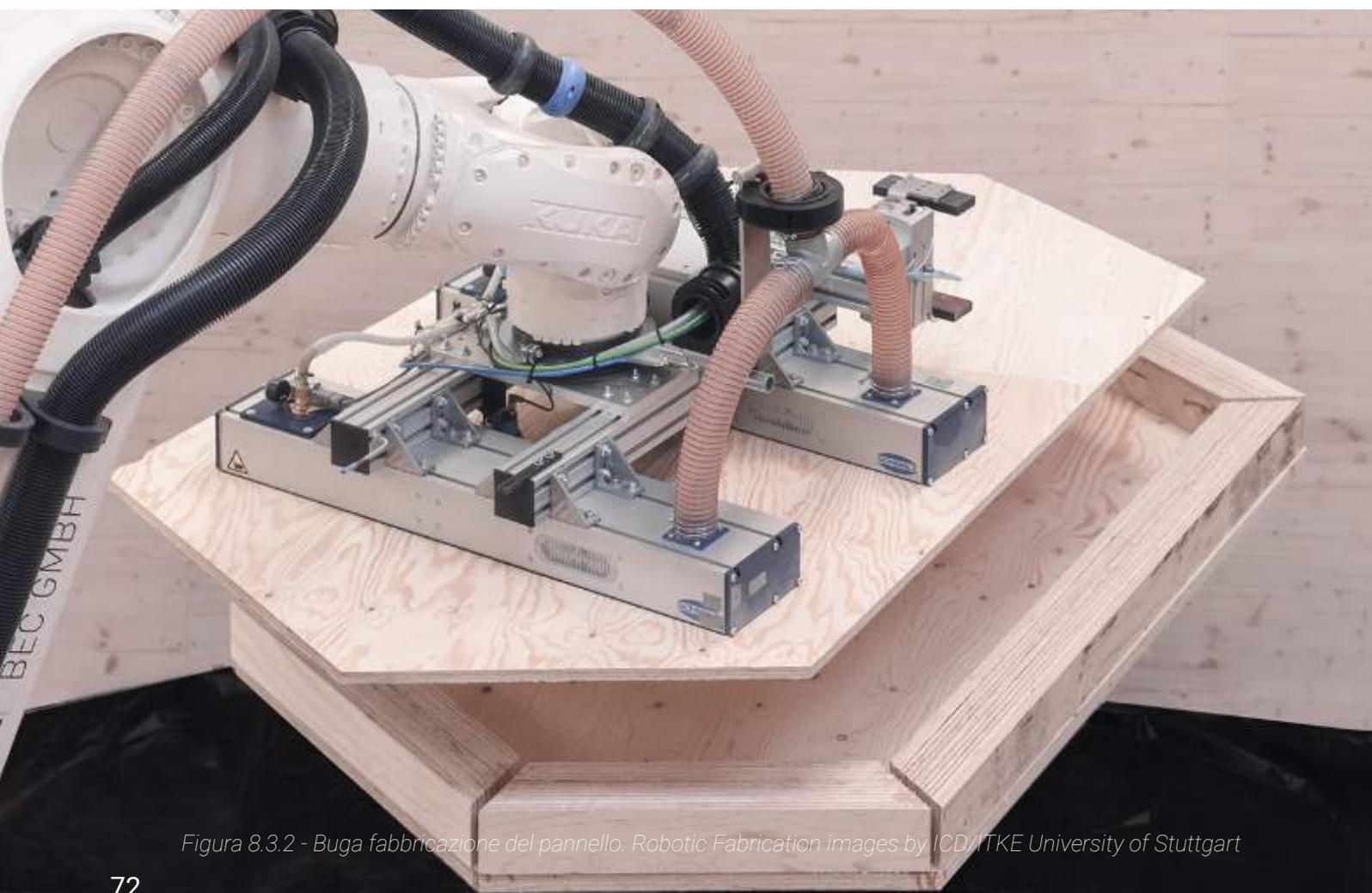


Figura 8.3.2 - Buga fabbricazione del pannello. Robotic Fabrication images by ICD/ITKE University of Stuttgart

Il legno lamellare viene utilizzato nelle costruzioni al posto del legno massiccio per oltrepassare i limiti legati alle dimensioni del tronco e ridurre i difetti concentrati che il legno massiccio presenta dovuti alla crescita dell'albero (figura 8.2.1). Il legno lamellare si ottiene incollando tra loro le lamelle ottenute tagliando il legno secondo la direzione delle venature, in modo da avere la massima resistenza, dato che il legno è un materiale anisotropo la cui resistenza dipende fortemente dalla direzione delle fibre. Le lamelle vengono seccate e vengono rimossi meccanicamente gli eventuali difetti presenti, e successivamente vengono incollate tramite resine adesive (figura 8.2.2).

8.3 Sistema a pannello o a scatola vuota

Come visto nei casi studio riportati al capitolo 4, le segmented timber shells si possono raggruppare in due gruppi: quelli caratterizzati da un sistema costruttivo a pannelli (come il LAGA) e quelli con un sistema a scatola vuota (come il BUGA o l'HexBox).

Entrambi questi sistemi hanno vantaggi e svantaggi, utilizzare un sistema a pannelli semplici consente una più facile realizzazione poiché ogni elemento è singolo e pronto ad essere assemblato; sono infatti presenti molti esempi di questa tipologia di sistema costruttivo con diversi sistemi di collegamenti, ad esempio il già sopracitato LAGA (figura 8.3.1).

Il Sistema a scatola vuota invece è più complicato geometricamente, poiché richiede pezzi aggiuntivi per creare i lati e il pannello inferiore, i quali vanno appositamente generati tenendo conto dell'inclinazione della superficie, per cui il pannello inferiore sarà più piccolo di quello superiore, e le superfici laterali risultano inclinate e non perpendicolari al pannello superiore. Inoltre, i pannelli vanno assemblati nel sistema a scatole prima di poterli montare in situ per generare la struttura complessiva. Nonostante la maggiore difficoltà di fabbricazione e il passaggio aggiuntivo prima del montaggio in situ, il sistema a scatola vuota permette di rinforzare notevolmente la struttura nei punti di maggiore fragilità, ovvero dove c'è una discontinuità tra un pannello e l'altro, senza dover aumentare lo spessore di tutta la struttura e garantendo quindi un peso minore rispetto a dei pannelli di tipo semplice con lo spessore aumentato (figura 8.3.2).

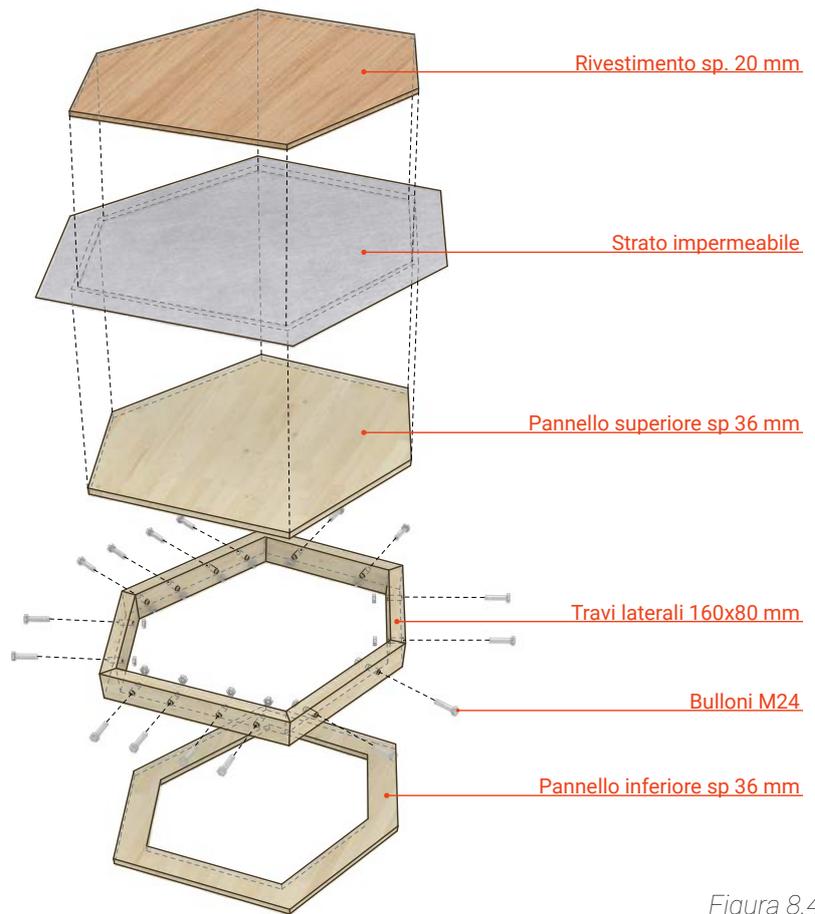


Figura 8.4.1

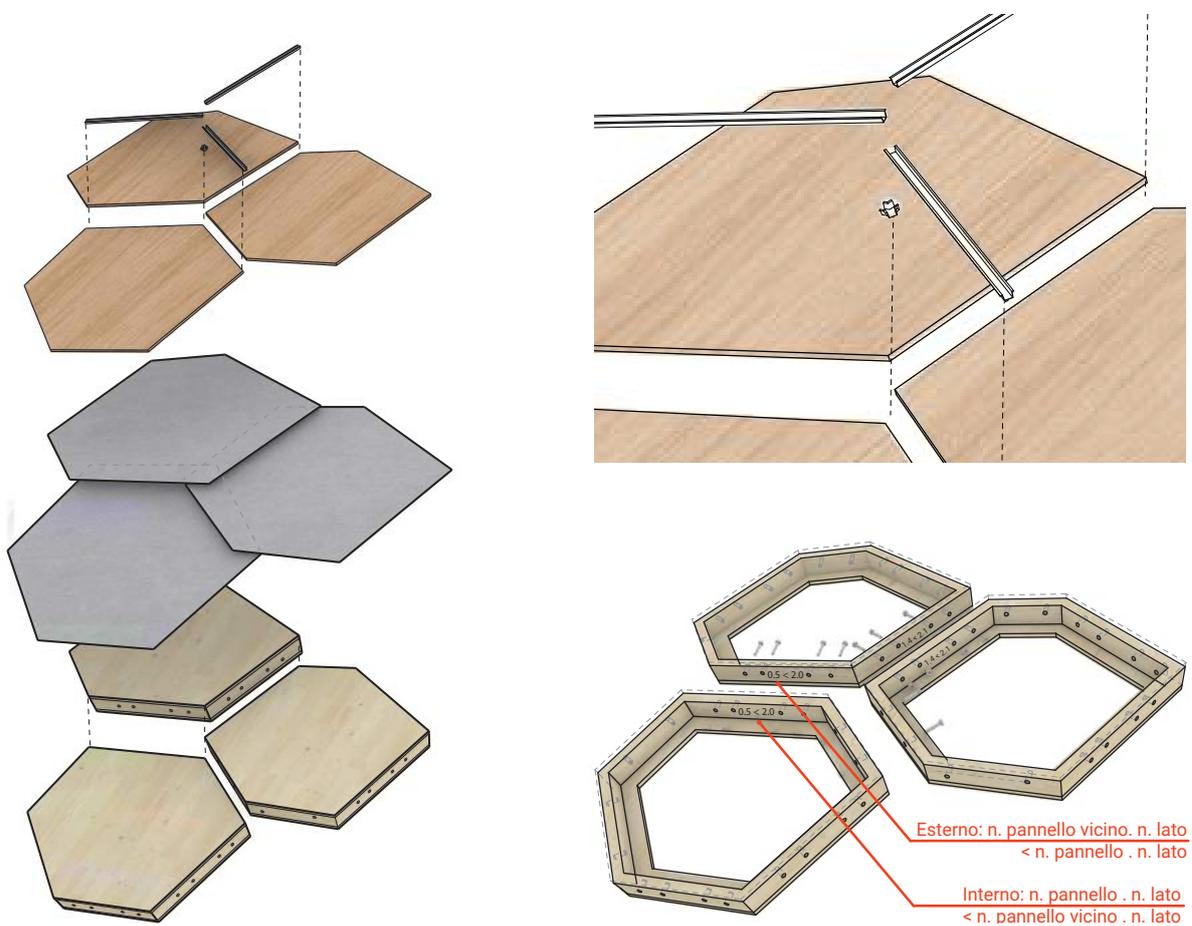


Figura 8.4.2

Il sistema a scatola vuota è quindi più efficiente nell'utilizzo del materiale ed è molto leggero rispetto alle sue capacità spaziali (Bechert, et al., 2018); come è già stato visto nel confronto effettuato tra i due padiglioni LAGA e BUGA, dove il secondo, con la stessa quantità di materiale utilizzato al metro quadro arriva a coprire un'area di circa il triplo rispetto al primo.

8.4 Stratigrafia del pannello e giunti

Si sceglie di utilizzare un sistema a scatola vuota per i pannelli giuntati tramite bullonature. I pannelli inferiori e superiori sono spessi 36 mm, e in particolare il pannello inferiore è forato seguendo il profilo esterno per garantire l'accesso alle connessioni. Le travi laterali sono di dimensioni h 160 x b 80 mm. I pannelli vengono inoltre incisi ai lati interni ed esterni secondo la seguente denominazione. Nel lato interno:

$$\begin{aligned} & \text{"numero del pannello"} + \text{"."} + \text{"numero del lato"} \\ & < \\ & \text{"numero del pannello vicino"} + \text{"."} + \text{"numero del lato"} \end{aligned}$$

Nel lato esterno:

$$\begin{aligned} & \text{"numero del pannello vicino"} + \text{"."} + \text{"numero del lato"} \\ & < \\ & \text{"numero del pannello"} + \text{"."} + \text{"numero del lato"} \end{aligned}$$

In questo modo la denominazione vista dallo stesso lato è uguale. Sopra ai pannelli si pone uno strato di tessuto impermeabile più grande del pannello così da risultare sovrapposti. Sopra a questo si pone uno strato di rivestimento spesso 20 mm leggermente più piccolo per poter inserire negli spazi rimanenti delle canaline di base 30 mm per lo scolo delle acque a terra (figura 8.4.1 e 8.4.2).

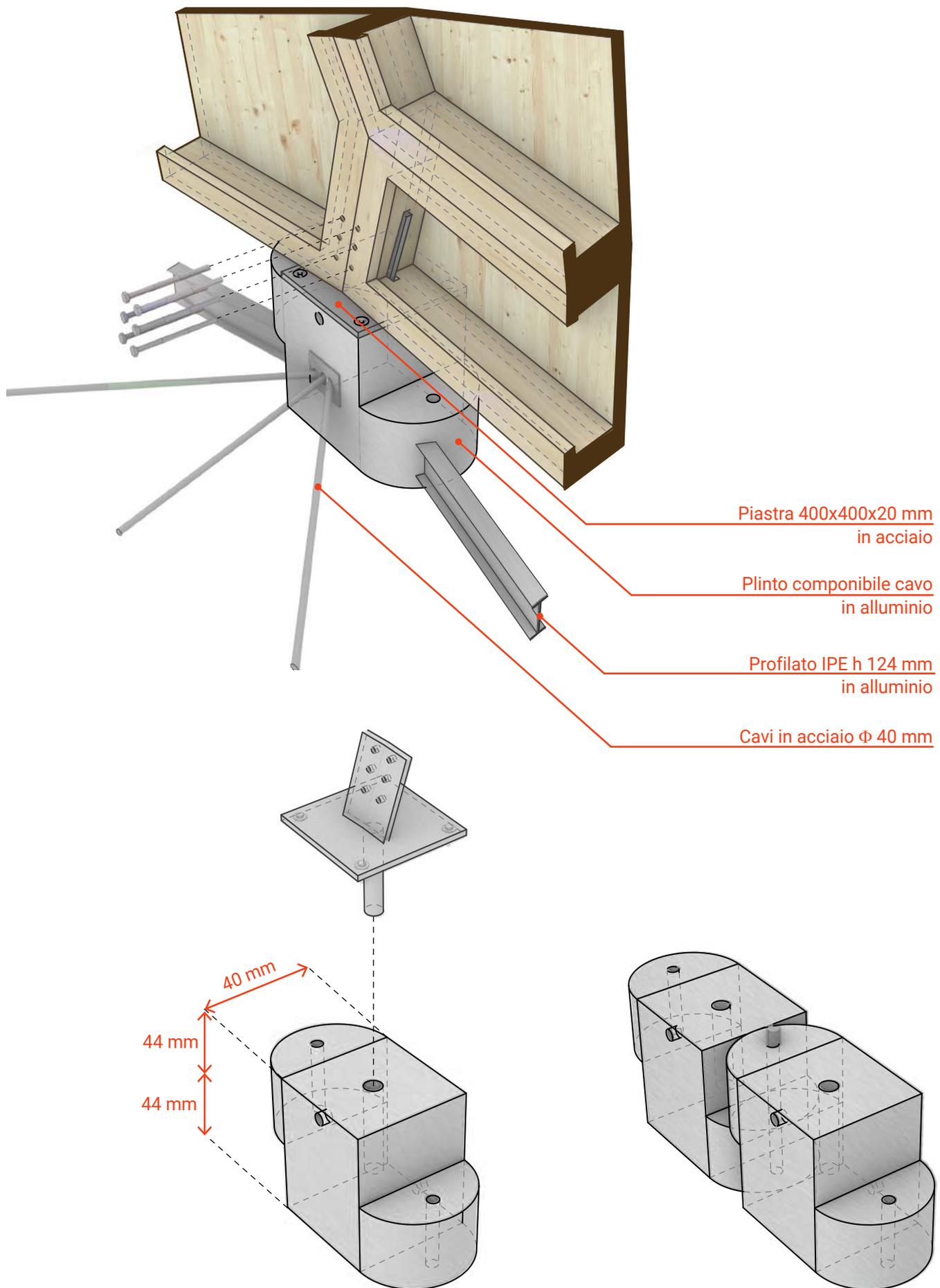


Figura 8.5.1

8.5 Attacco a terra

L'attacco a terra è svolto tramite uno spinotto inserito nelle travi e collegato tramite bullonature, saldato poi ad una piastra. La piastra si inserisce in un plinto tramite barra saldata inserita nel plinto e quattro bulloni agli angoli.

Il plinto è prefabbricato in alluminio cavo, con una forma studiata per essere assemblabili in modo da poter aumentare il peso a terra. I plinti sono cavi e possono essere riempiti con acqua o sabbia tramite due tappi uno nella parte alta per riempire il plinto e uno nella parte bassa per svuotarlo. In questo modo, i plinti sono leggeri nella fase di trasporto e montaggio ma forniscono il peso necessario per ancorare a terra la struttura. I lati del plinto sono stondati in modo da poterli ruotare a seconda della direzione delle travi.

I plinti sono collegati tramite cavi in acciaio di diametro 40 mm, collegati con una piastra a fori asolati ai lati e tramite profilati IPE h 124 mm in alluminio nei lati frontali.

A coprire la struttura alla base si utilizza un pavimento flottante, con struttura adattabile in altezza per mantenere il pavimento a livello anche in caso di appoggi scoscesi.

9. ANALISI STRUTTURALE

9.1 Comportamento delle strutture a guscio a pannelli

Come è già stato accennato le strutture a guscio fanno uso della capacità portante del materiale trasferendo i carichi principalmente tramite forze di membrana (in tensione o in compressione) e minimizzando gli sforzi flessionali. Tuttavia, la realizzazione di una struttura continua è poco pratica, per questo l'utilizzo di pannelli planari è un'alternativa interessante, unendo i vari pannelli tramite connessioni rigide che permette di seguire gli stessi principi strutturali dei gusci ma con una realizzazione più semplice (Knippers & Li, 2015).

Le strutture a guscio che fanno utilizzo di una griglia solitamente necessitano di rinforzi ai giunti per stabilizzare la struttura contro gli sforzi di flessione; al contrario utilizzando pannelli che si incontrano a tre in un nodo e sono collegati attraverso i propri spigoli ogni pannello viene bloccato dagli altri due, bloccando i movimenti relativi. Questo permette di avere connessioni più semplici e di ridurre i momenti ai nodi.

In generale la trasmissione delle forze nella struttura a guscio è influenzata dal pattern dei pannelli. Poiché la discontinuità del materiale nei giunti le forze vengono ridirezionate quando passano attraverso le connessioni. L'altro elemento che influenza la trasmissione delle forze è la rigidità delle connessioni, più queste sono rigide maggiori saranno le forze che passano attraverso di esse.

L'influenza del pattern generato dai pannelli è dimostrata da Jan Knippers e Jian-Min Li (2015) nel caso dello studio strutturale del Landergartenschau Exhibition Hall, tramite un modello semplificato con due pattern differenti, e ad ognuno di essi è applicato un carico concentrato verticale (figura 9.1.1 e 9.1.2).

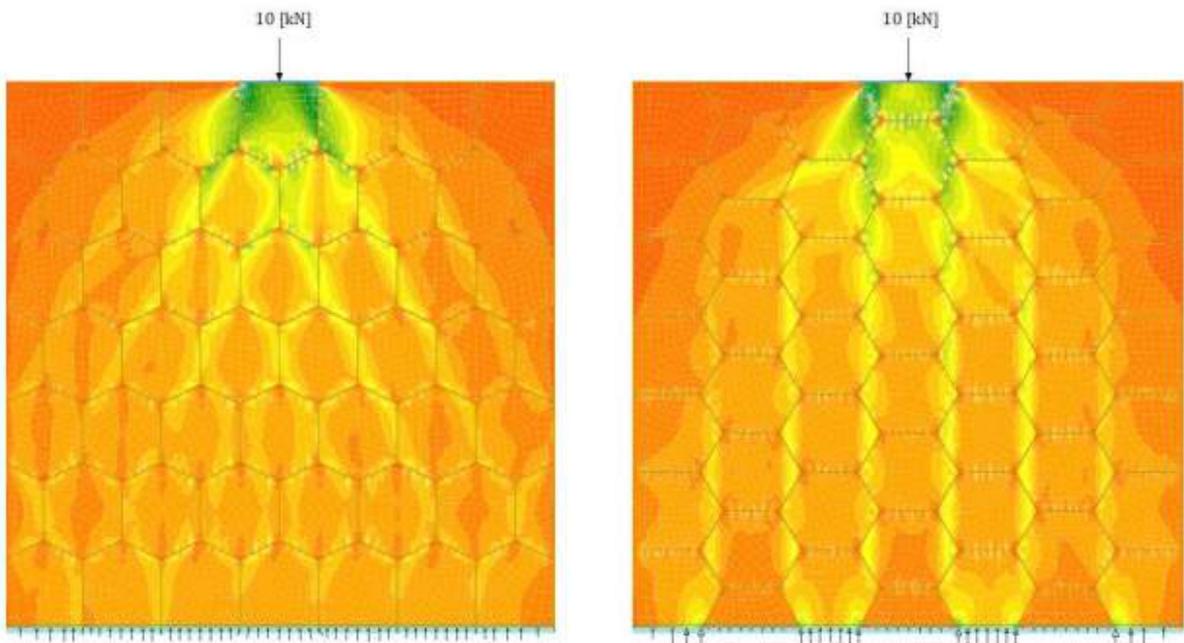


Figura 9.1.1 - Knippers & Li, 2015

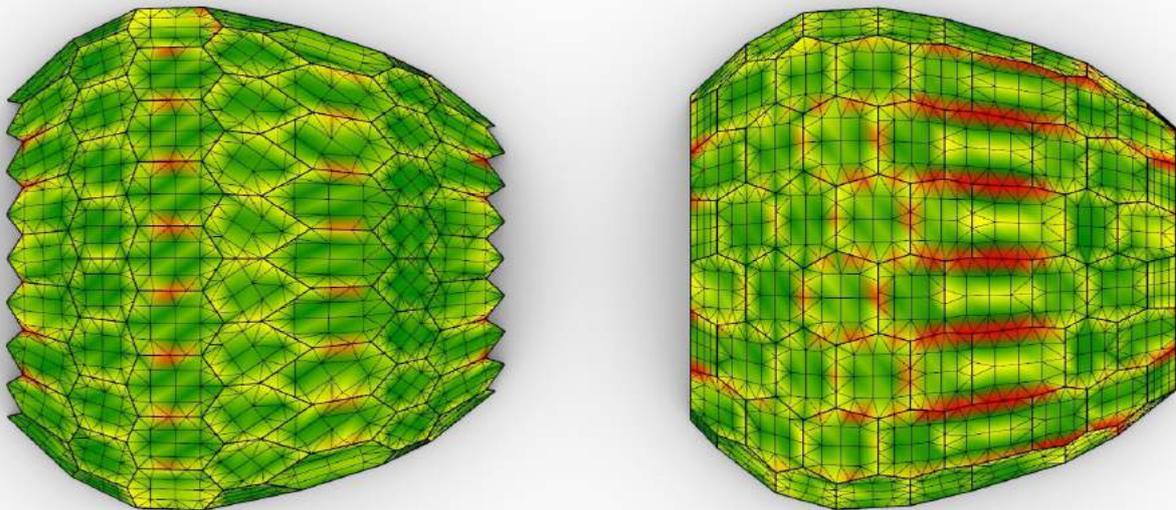


Figura 9.1.2

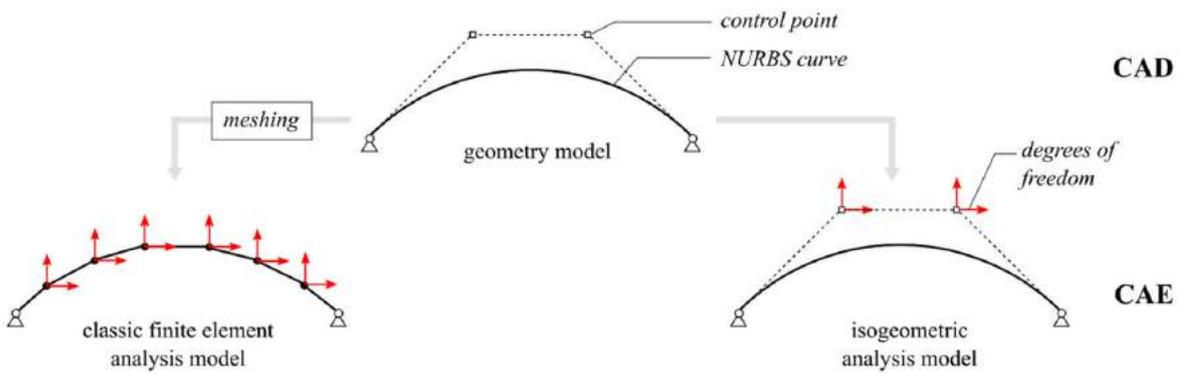


Figura 9.2.1 - Bauer, 2020.

Si nota come le forze si concentrano agli spigoli e scorrono paralleli ad essi. Le forze sono quindi trasferite tra i pannelli come sforzi di taglio nel piano. Il pattern dimostrato a sinistra mostra quindi una distribuzione più uniforme degli sforzi e quindi genera forze più basse agli appoggi; al contrario il pattern a destra concentra le forze solo in alcuni punti degli appoggi generando quindi sforzi maggiori.

9.2 Analisi isogeometrica

Per l'analisi strutturale si è scelto di usare il plug-in Kiwi3d per Grasshopper e Rhinoceros, che si basa sull'analisi isogeometrica per integrare direttamente l'analisi strutturale con il modello CAD.

L'analisi isogeometrica è un sottogruppo dei "finite element methods" che utilizza superfici NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) come basi per gli elementi finiti. essendo nei modelli CAD comunemente usate le geometrie NURBS è possibile evitare una completa riparametrizzazione del modello CAD, generando delle geometrie Mesh costituite da tanti elementi infinitesimi, per effettuare l'analisi.

In generale i "finite element methods" sono dei metodi che utilizzano il calcolo computazionale per ottenere delle soluzioni approssimate a diversi tipi di problemi ingegneristici, tra cui problemi meccanici, fluidodinamici, termodinamici o elettromagnetici.

Nel caso di problemi meccanici lo scopo è solitamente quello di calcolare gli sforzi, le tensioni e le deformazioni nella struttura scelta. Queste sono le variabili del problema. Le tensioni interne si sviluppano per mantenere l'equilibrio in una parte o in tutta la struttura, ed è imponendo l'equilibrio che si trova il valore delle variabili. In particolare, questo metodo approccia il problema dividendo la struttura in parti più piccole che sono connesse tramite nodi. Questo processo è detto di discretizzazione, ed è utile poiché in questo modo l'equilibrio non è più soddisfatto in maniera continua dalla struttura ma dalle singole parti.

Per conoscere le tensioni interne alla struttura si calcola prima lo spostamento di ogni nodo, così da poter ricavare in secondo luogo sforzi e tensioni. Per ogni elemento si considerano tutti i possibili spostamenti, incluse le rotazioni. Ognuno di questi spostamenti corrisponde ad un grado di libertà.

Per calcolare gli spostamenti si fa utilizzo delle matrici di rigidezza, dove per ogni elemento la matrice è quadrata, con il numero di righe e colonne che corrispondono ai gradi di libertà dell'elemento e all'interno della matrice vi sono la resistenza a deformazione dell'elemento rispetto a quel grado di libertà.

Una volta calcolate le matrici di rigidezza per ogni elemento possono essere combinate per ottenere la matrice di rigidezza globale della struttura, dove anche questa è una matrice quadrata con il numero di righe e colonne che corrisponde ai gradi di libertà totali della struttura. Ogni qual volta si ha un nodo connesso ad un altro il loro spostamento sarà unico, per cui i valori della matrice di rigidezza vengono sommati.

Una volta ottenuta la matrice di rigidezza totale si risolve il problema imponendo le condizioni al contorno e i carichi esterni e si possono ricavare gli spostamenti ai nodi per ogni elemento, e di conseguenza gli sforzi e le tensioni interne.

La parte più complicata nel risolvere il problema sta nel calcolare le matrici di rigidezza e risolvere il calcolo per ottenere gli spostamenti, ed è svolta infatti dal software scelto. Ciò che è importante per l'utente è definire in maniera corretta il problema e scegliere la divisione in elementi della struttura. Solitamente questi metodi fanno utilizzo di suddivisione tramite mesh a facce triangolari o quadrate.

Il primo problema che il processo di meshing crea è quello di una perdita di informazioni geometriche. Inoltre, essendo la mesh un'approssimazione della geometria iniziale l'accuratezza dell'analisi dipende dalla densità della mesh e in particolare nelle strutture a guscio con spessori molto bassi, delle piccole imperfezioni geometriche influiscono notevolmente sul comportamento complessivo della struttura. Infine, il processo di suddivisione in elementi infinitesimi e il calcolo computazionale per ciascuno di essi è dispendioso in termini di tempo. Tramite l'analisi isogeometrica le funzioni utilizzate per la descrizione geometrica nel modello CAD sono adottate nell'analisi strutturale così da poter emettere il passaggio di meshing (Kiendl, 2011).

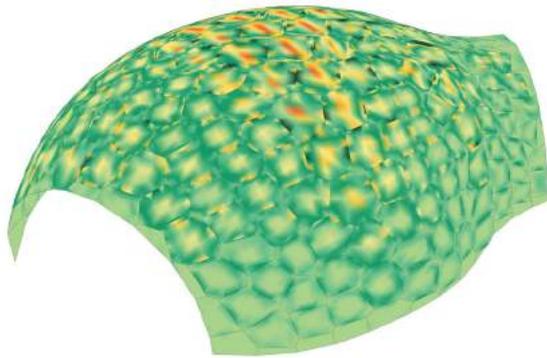
In maniera simile all'analisi per elementi finiti FEA, anche l'analisi isogeometrica funziona per elementi; tuttavia, i gradi di libertà non corrispondono a elementi sulla superficie della struttura ma sui punti di controllo della geometria, in questo modo è possibile raffinare l'analisi senza dover rigenerare o modificare la geometria. (figura 9.2.1)

9.3 Valutazione dei risultati

Essendo la struttura costruita tramite pannelli a scatolari cavi si sceglie di rappresentarla tramite due modelli separati:

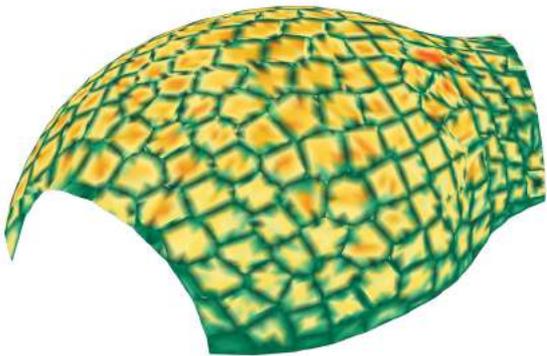
il primo è costituito da "*shell elements*", ovvero lastre piane sul quale posano gli strati di rivestimento; questo modello rappresenta il pannello superiore e serve a verificarne la resistenza, principalmente alle deformazioni e agli sforzi di trazione/compressione. Il secondo è un modello di travi, o "*beam elements*", che serve a rappresentare i bordi laterali del pannello, che hanno sezione maggiore e che rappresentano la parte più sollecitata del pannello. Su questo modello va considerato oltre ai carichi esterni il peso del pannello inferiore.

Si è scelto di rappresentare i modelli separatamente per ottenere dei risultati corretti a livello degli output del plug-in scelto, in modo da ottenere valori comparabili alle verifiche richieste dalle NTC 2018. Tuttavia, il comportamento del pannello scatolare non è esattamente uguale a quello ottenuto considerando gli elementi separatamente; per questo si è scelto di incrementare i valori di rigidità della sezione scelta per le travi del 15%. Dopo aver effettuato delle prove confrontando i valori di deformazione tra un modello con travi e lastre superiori e inferiori e un modello con solo le travi ma con la rigidità aumentata, fino a che le deformazioni dei due modelli risultassero entro 0.1 mm.



PM1: Flessione parallela

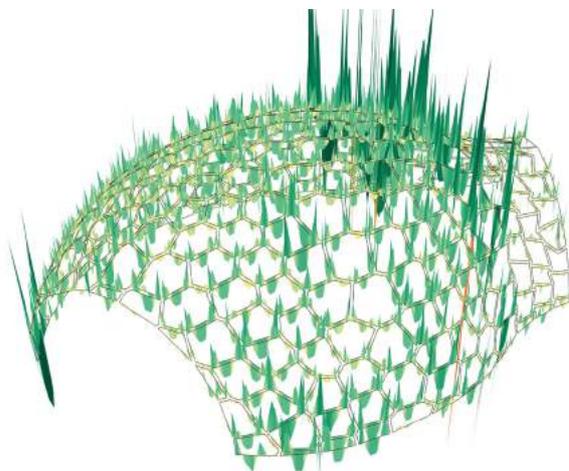
coefficiente di sicurezza = 0.01
kN/m²
 -0.0663
 -0.0390
 -0.0116
 0.0157
 0.0431
 0.0704
 0.0978
 0.1251
 0.1525
 0.1798



PM1: Flessione perpendicolare

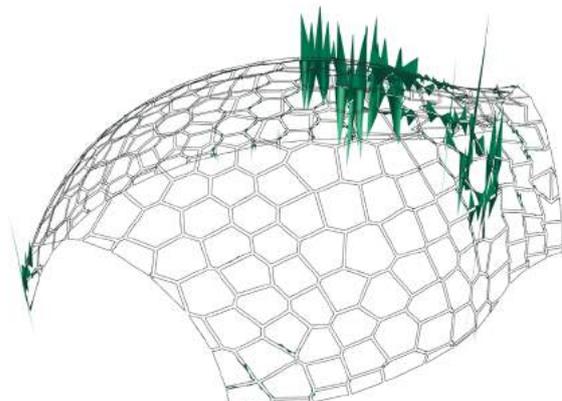
coefficiente di sicurezza = 0.01
kN/m²
 -0.1905
 -0.1677
 -0.1449
 -0.1221
 -0.0993
 -0.0765
 -0.0537
 -0.0309
 -0.0081
 0.0147

Shell: Verifica a flessione parallela e perpendicolare



M1: Flessione parallela

coefficiente di sicurezza = 0.1
kN*m
 -0.556
 -0.440
 -0.323
 -0.206
 -0.089
 0.027
 0.144
 0.261
 0.378
 0.494



M2: Flessione perpendicolare

coefficiente di sicurezza = 0.09
kN*m
 -0.130
 -0.102
 -0.073
 -0.045
 -0.017
 0.011
 0.040
 0.068
 0.096
 0.124

Beam: Verifica a flessione parallela e perpendicolare

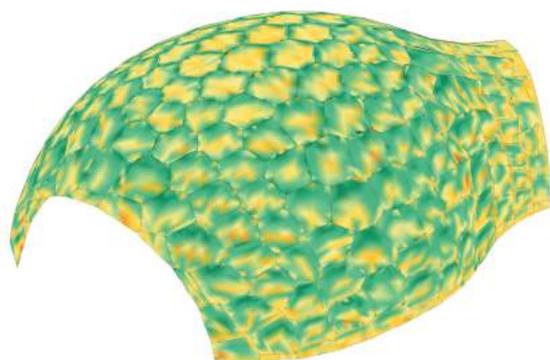
Il materiale scelto è il legno lamellare incollato, classificato secondo le norme europee EN 14080 e EN1194, GL28h, le cui proprietà sono:

- Resistenza a flessione $f_{m,g,k} = 28.00 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a trazione parallela alla fibratura $f_{t,0,g,k} = 22.30 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a trazione perpendicolare alla fibratura $f_{t,90,g,k} = 0.50 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a compressione parallela alla fibratura $f_{c,0,g,k} = 28.00 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a compressione perpendicolare alla fibratura $f_{c,90,g,k} = 2.50 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a taglio $f_{v,g,k} = 3.50 \text{ N/mm}^2$
- Modulo elastico medio parallelo alle fibre $E_{0,g,\text{mean}} = 12600.00 \text{ N/mm}^2$

Nelle quali si nota la grande differenza presente tra le resistenze parallele e perpendicolari alla fibratura. I valori riportati sono i valori caratteristici, che vanno moltiplicati con gli appositi coefficienti per ottenere i valori di progetto da utilizzare nelle verifiche.

- $K_{\text{mod}} = 0.8$
- Classe durata del carico media
- $g_m = 1.45$
- Classe di servizio 2

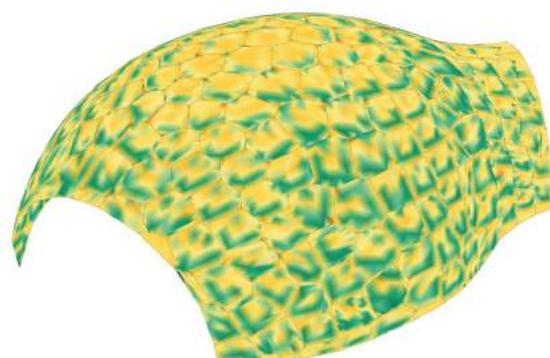
Le verifiche effettuate sono tutte ampiamente verificate e si nota come le travi sono molto più caricate dei pannelli, come riportato precedentemente. Nonostante i valori ottenuti avrebbero permesso di mantenere delle travi più lunghe, e conseguentemente un minor numero di pannelli più grandi. si è scelto di mantenere le travi sempre sotto i due metri di lunghezza in quanto questo facilita il processo di montaggio.



PN1: Tensione normale parallela

coefficiente di sicurezza = 0.01

kN/m²
-1.022
-0.355
0.312
0.978
1.645
2.311
2.978
3.644
4.311
4.978

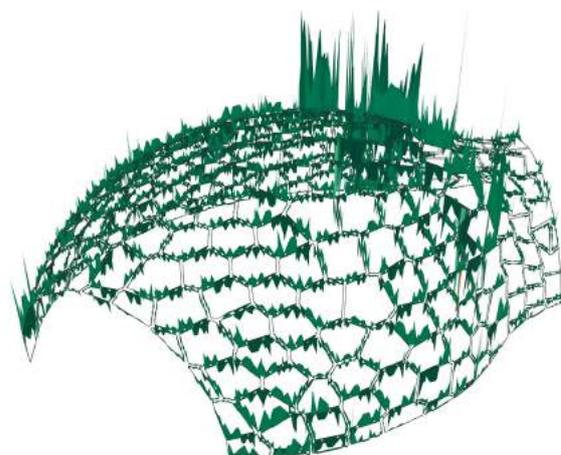


PN2: Tensione normale perpendicolare

coefficiente di sicurezza = 0.005

kN/m²
-4.1636
-3.6242
-3.0849
-2.5455
-2.0061
-1.4667
-0.9274
-0.3880
-0.1514
0.6908

Shell: Verifica a compressione e trazione, parallela e perpendicolare

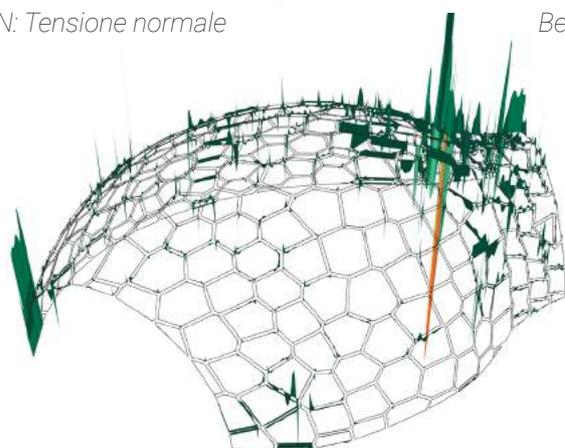


N: Tensione normale

coefficiente di sicurezza = 0.11

kN
-3.636
-3.049
-2.462
-1.875
-1.288
-0.700
-0.113
0.474
1.061
1.648

Beam: Verifica a compressione parallela e perpendicolare

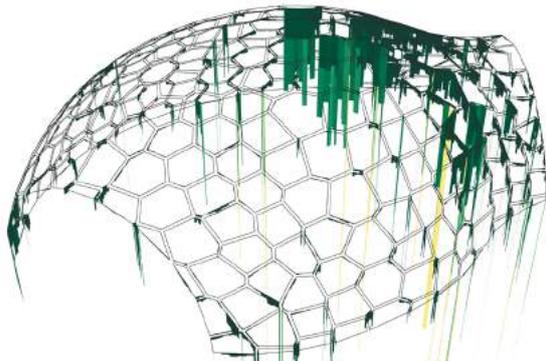


MT: Momento torcente

coefficiente di sicurezza = 0.02

kN*m
-0.0110
-0.0085
-0.0059
-0.0034
-0.0008
0.0017
0.0004
0.0068
0.0094
0.0119

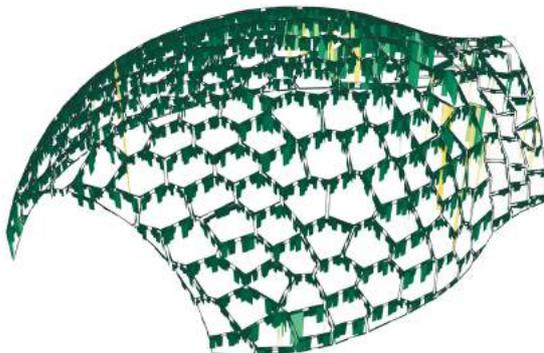
Beam: Verifica a torsione



PT1: Taglio parallelo

coefficiente di sicurezza = 0.35

kN/m²
0.002
 84.9
 169.7
 254.6
 339.4
 424.3
 509.2
 594.0
 678.9
 763.8

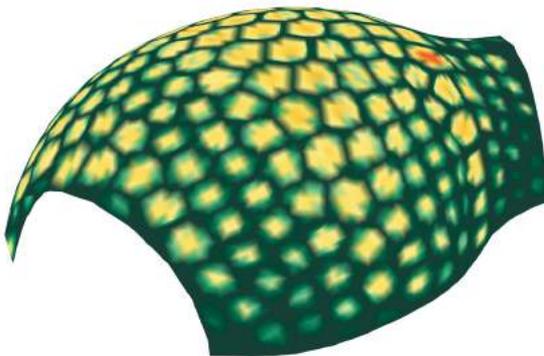


PT2: Taglio perpendicolare

coefficiente di sicurezza = 0.25

kN/m²
3.56
 59.1
 118.2
 177.3
 236.5
 295.6
 354.7
 413.8
 472.9
 532.0

Beam verifica a taglio parallelo e perpendicolare



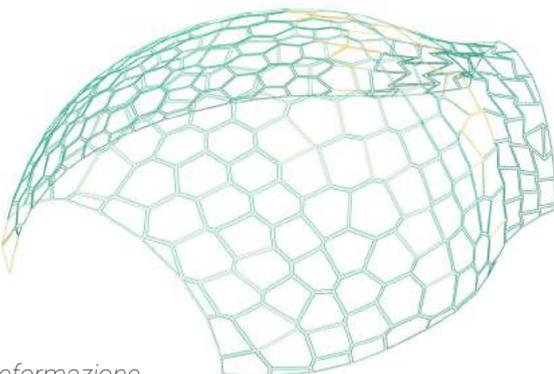
Deformazione

coefficiente di sicurezza = 0.

mm
0.010
 0.008
 0.007
 0.006
 0.005
 0.004
 0.003
 0.002
 0.001
 0.000

Shell: Verifica a deformazione

coefficiente di sicurezza = 0.1



Deformazione

mm
0.341
 0.307
 0.273
 0.239
 0.205
 0.170
 0.136
 0.102
 0.0680
 0.034

Beam: Verifica a deformazione

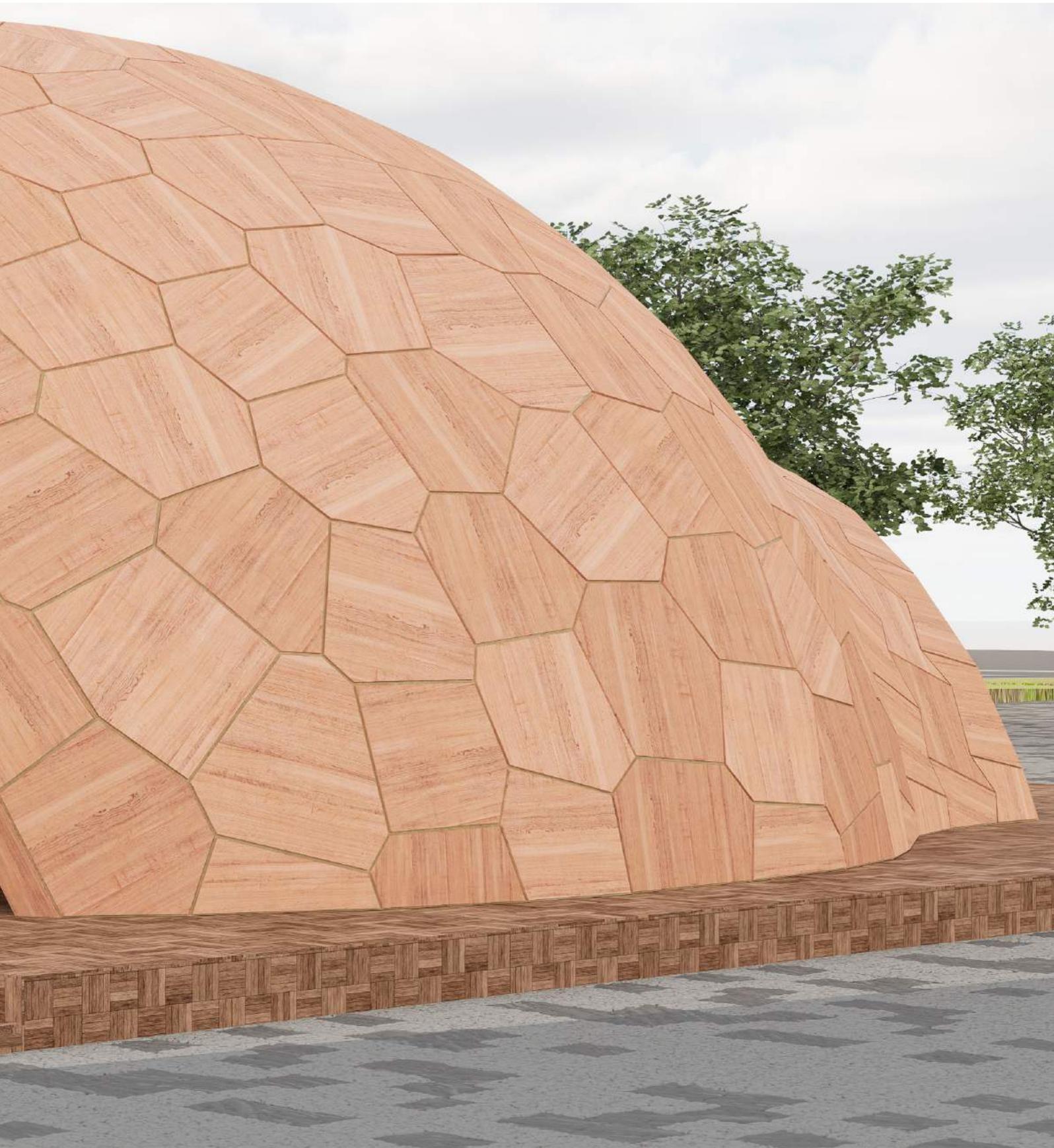
10. APPLICAZIONE ARCHITETTONICA

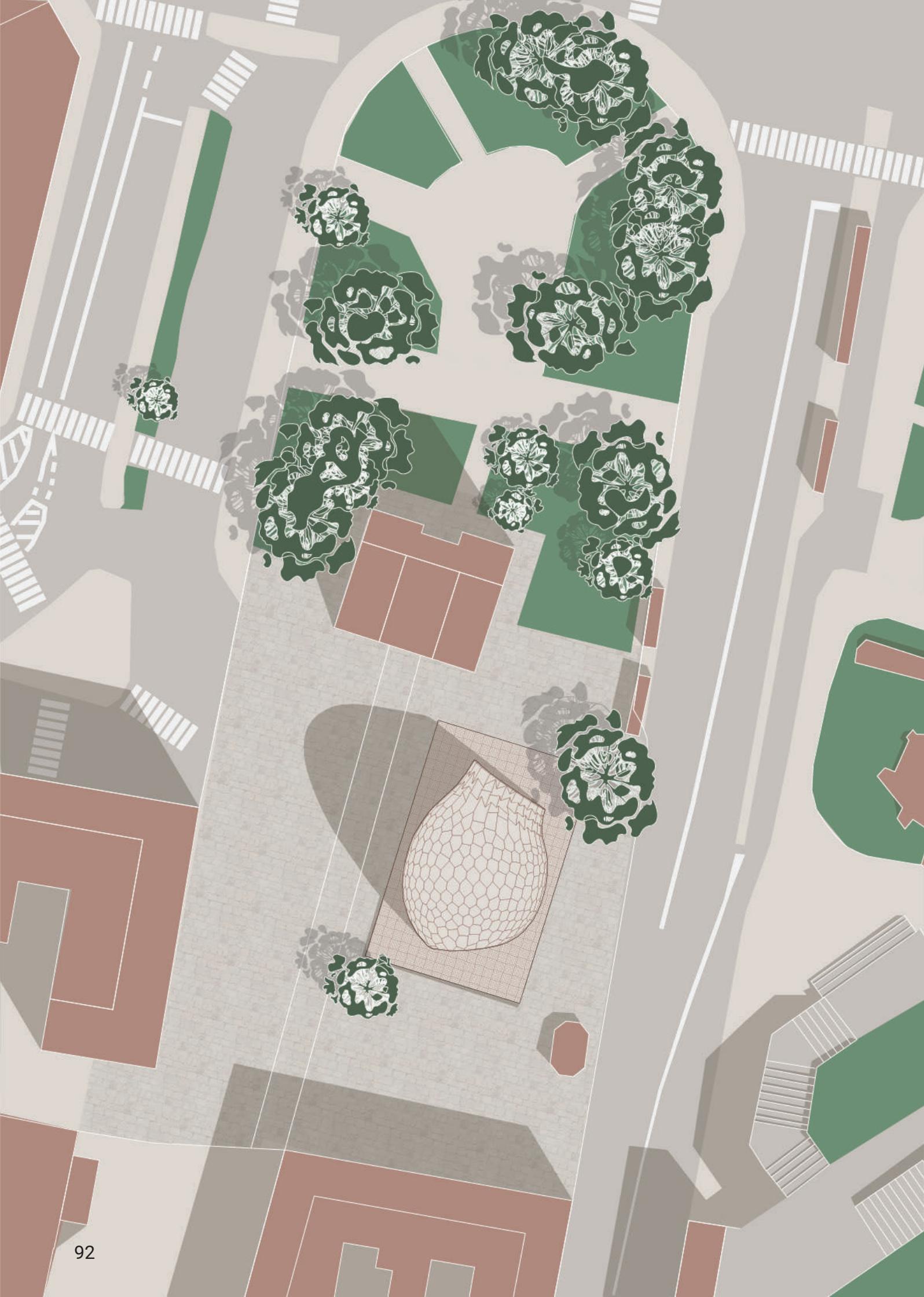
Si sceglie come sito per il padiglione Piazza XX Settembre a Bologna, in quanto luogo dove spesso vengono allestiti eventi temporanei e periodici; per questo motivo il progetto presentato risponde alle esigenze degli eventi in questione, dato lo spazio coperto disponibile, privo di appoggi intermedi, la possibilità di smontare e rimontare il padiglione e le accortezze prese per la facilità e velocità del processo di costruzione.

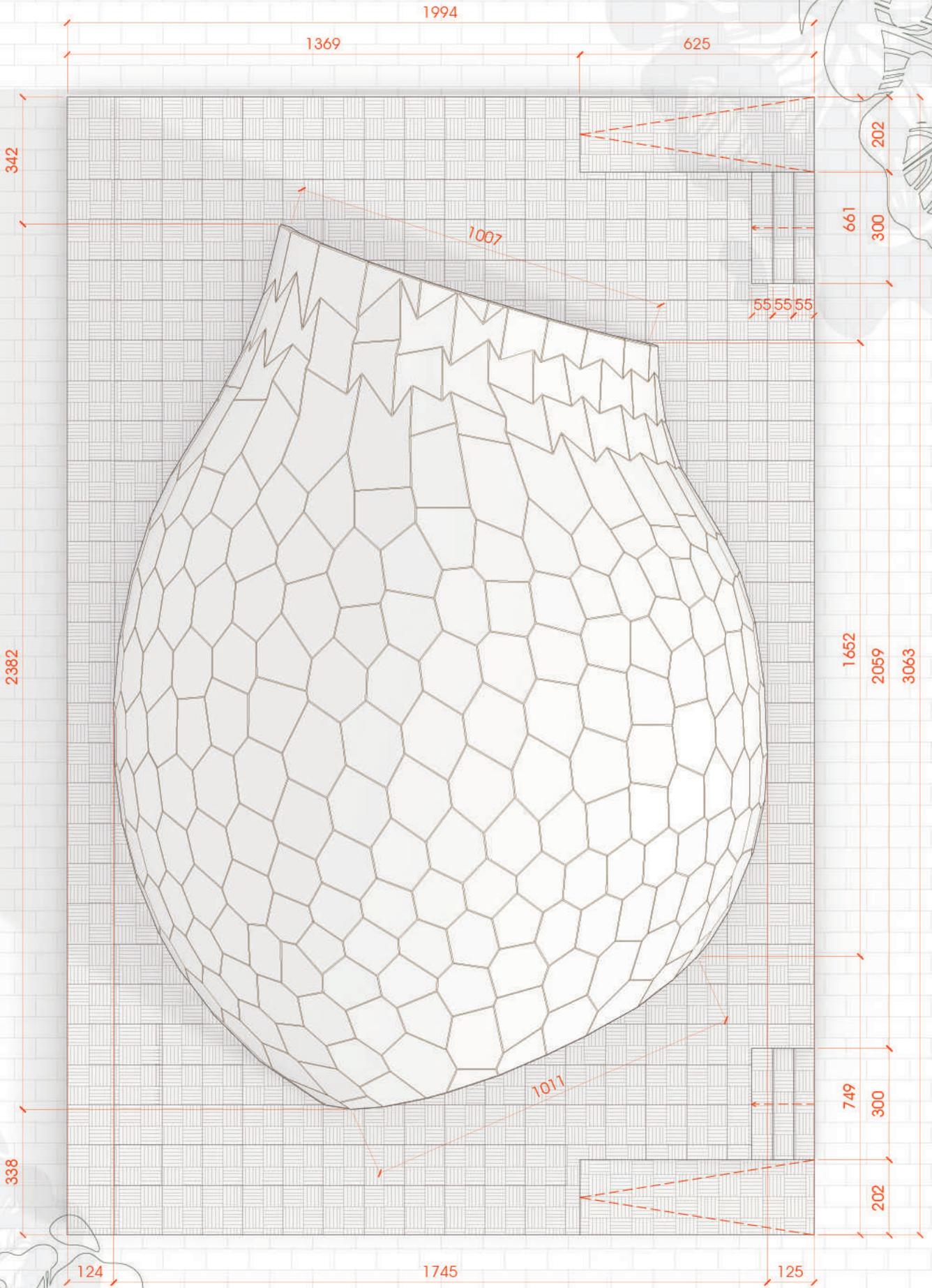
Il padiglione proposto ha un ingombro all'incirca di 24 metri in lunghezza e 17 in larghezza, è composto da 268 elementi, di cui le dimensioni sono state mantenute sotto i due metri per mantenere una buona manovrabilità durante il montaggio, che sarebbe tramite autogrù per sollevare i pannelli e con minimo due persone su impalcature per allinearli ed effettuare i collegamenti.

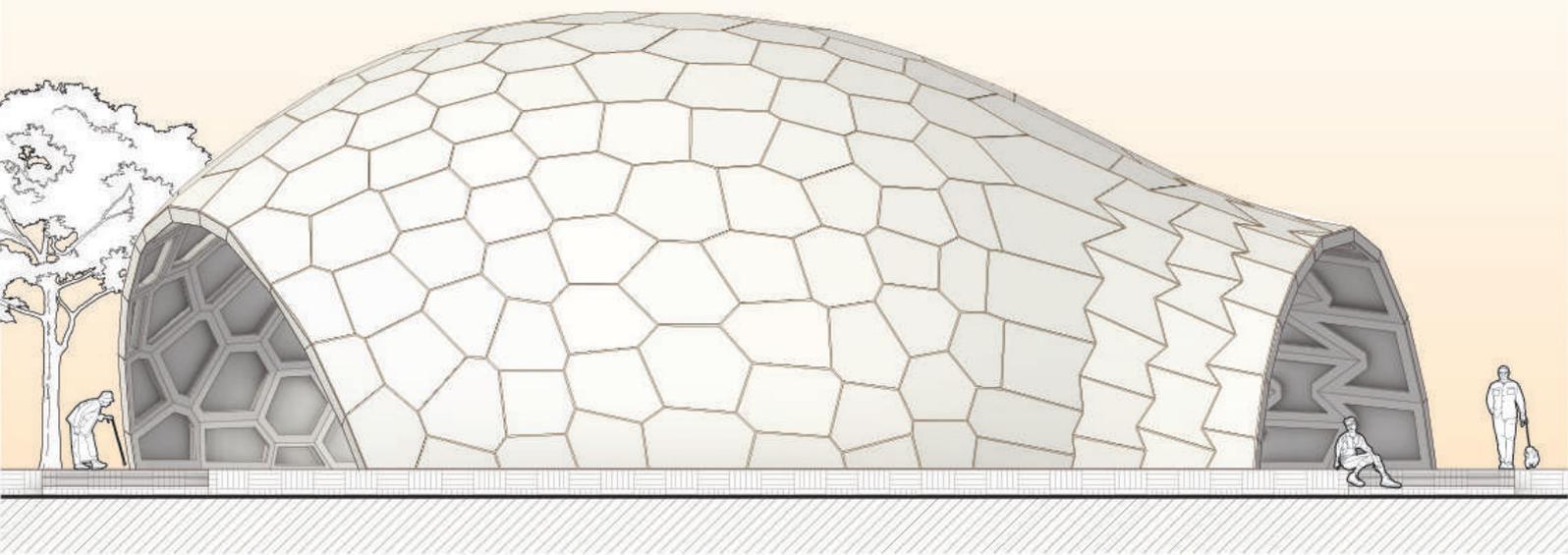
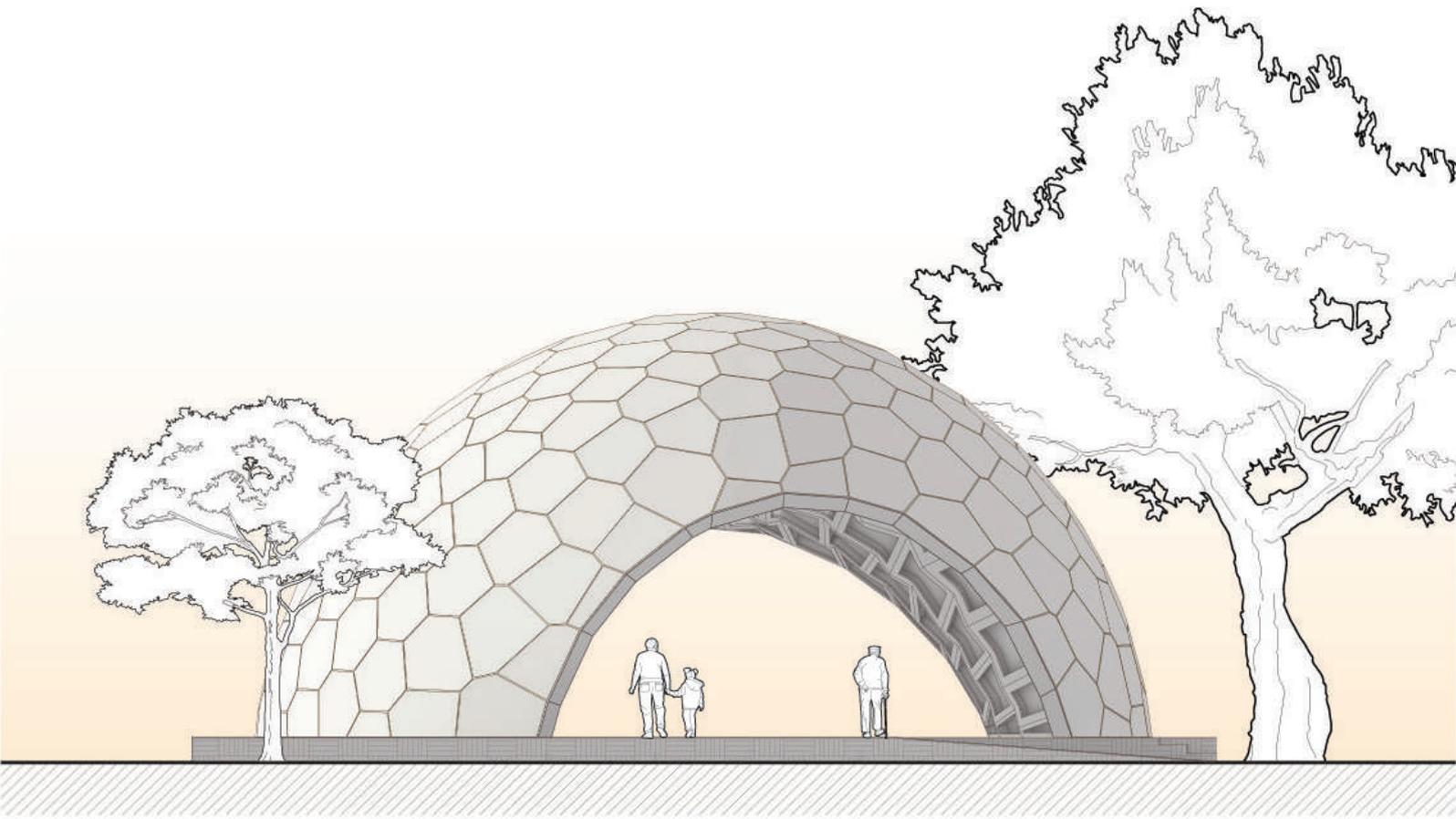
In totale per i pannelli si utilizza un volume di $39,90 \text{ m}^3$ di legno per coprire un'area di 300 m^2 , questo pone il rapporto tra materiale utilizzato e area coperta a $36,9 \text{ kg/m}^2$, ovvero in linea con i valori ottenuti nei casi studio presentati al capitolo 4, tenendo conto dei compromessi fatti sulla massima efficienza nell'utilizzo del materiale per facilitare la costruzione e la velocità di montaggio.

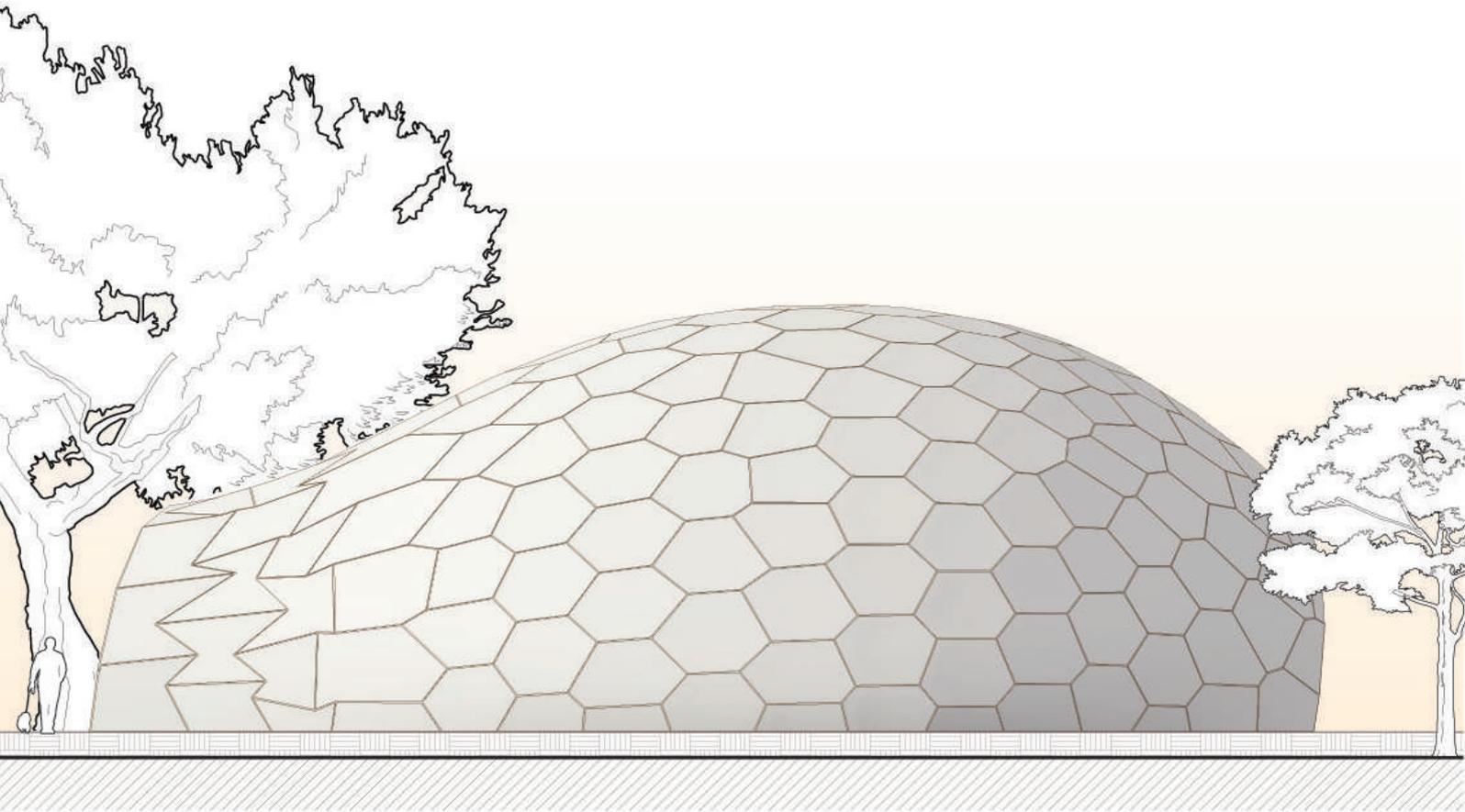
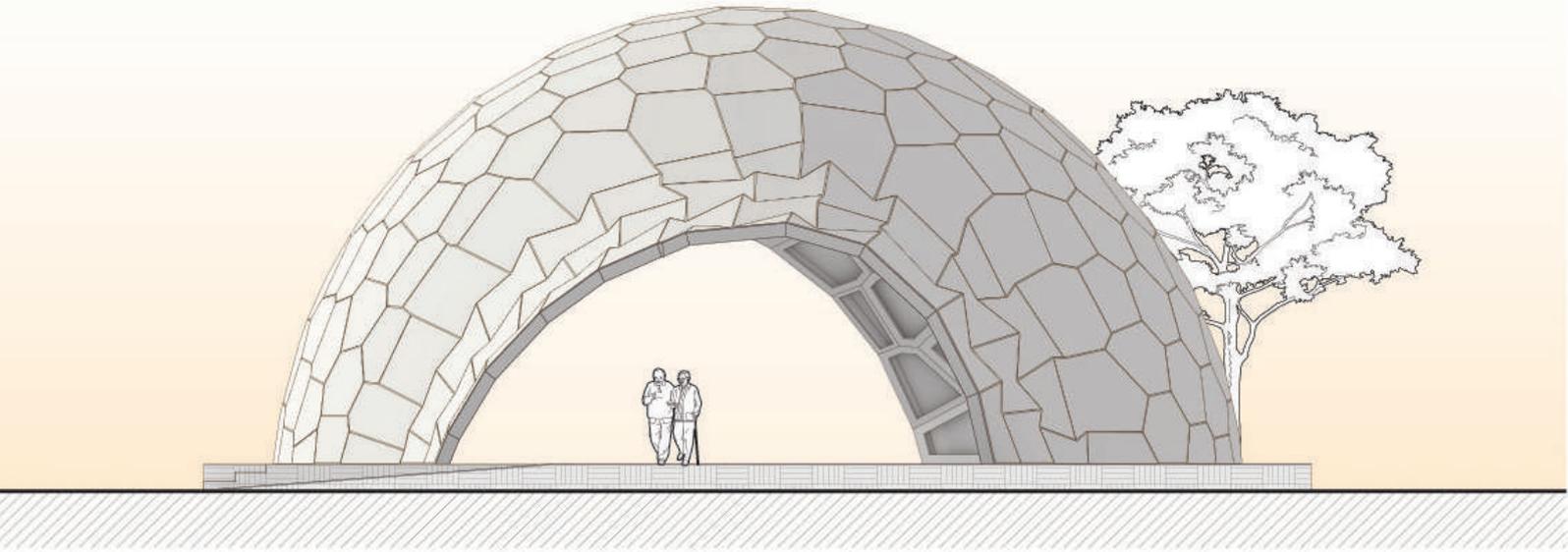






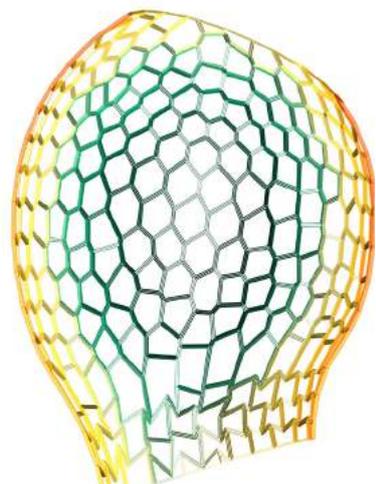
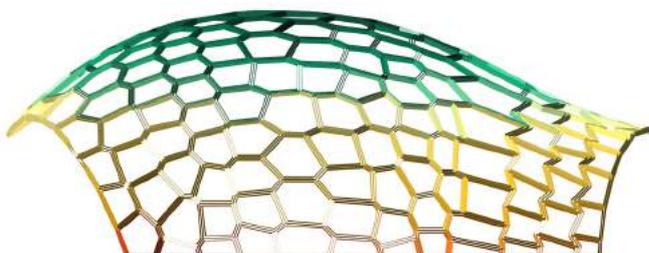


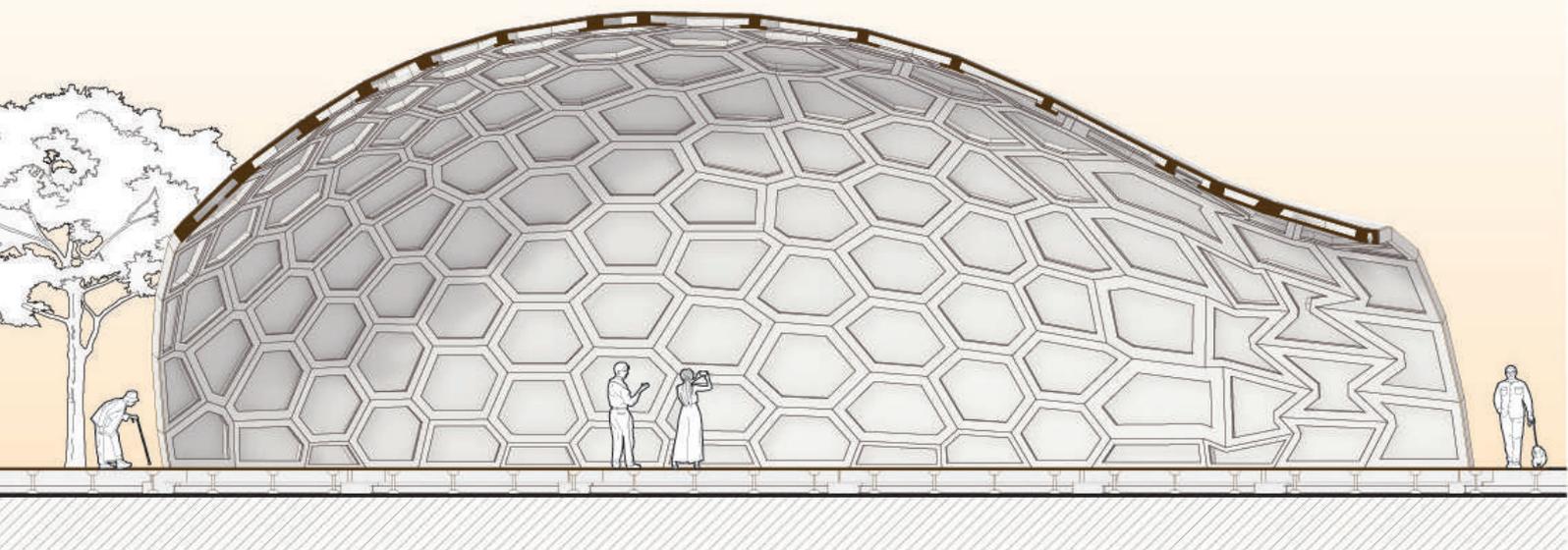
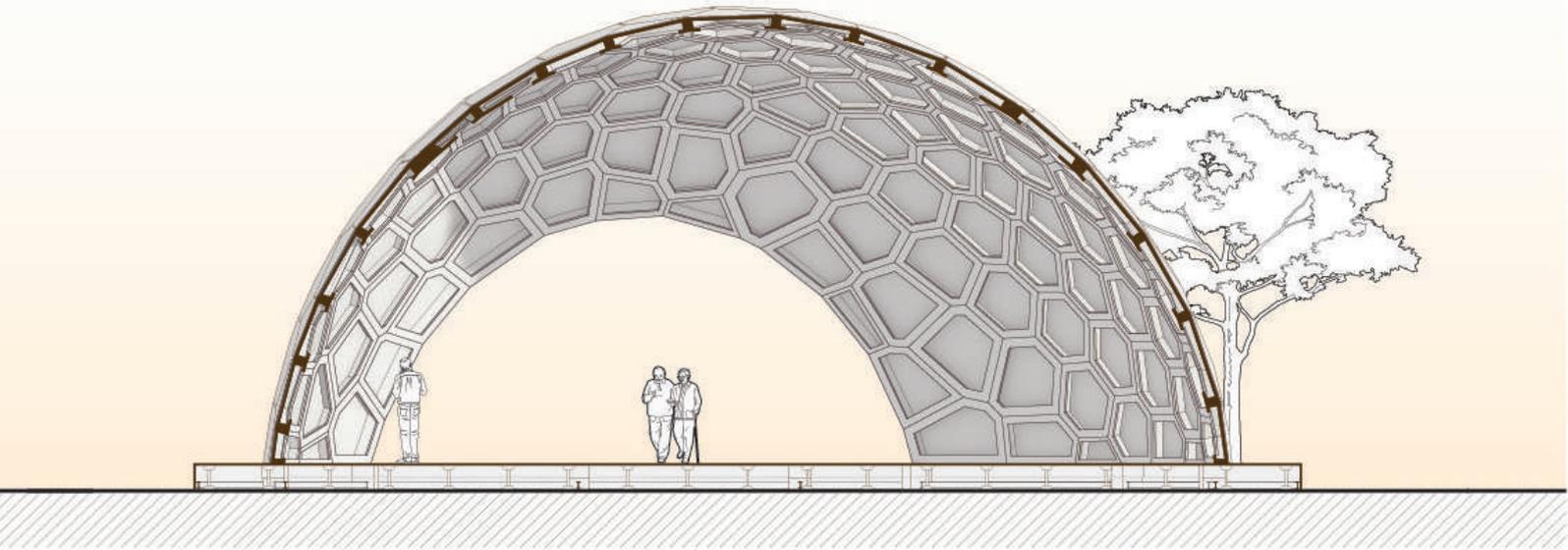






Ordine di montaggio













11. CONCLUSIONI

La metodologia esplorata offre un punto di partenza per la realizzazione di sistemi che integrino scelte creative e criteri costruttivi.

In particolare, si è dimostrato come l'utilizzo di sistemi multi-agente permettano di controllare variabili complesse senza imporre un risultato fermo ma esplorando le possibilità dei metodi affrontati; in questo caso permettendo di esplorare la discretizzazione delle superfici a doppia curvatura anche nei casi di superfici con cambi di curvatura. Sicuramente il metodo utilizzato ha dei limiti che sono stati riscontrati nel corso della tesi, e richiede uno sforzo particolare nella fase di modellazione a priori delle superfici; ed uno sviluppo futuro sarebbe quello di generare un algoritmo più robusto che risponda anche ai casi estremi.

Inoltre, la progressione del metodo proposto è quella di includere sempre più obiettivi desiderati come comportamenti degli agenti. Ad ora la distribuzione per ottenere tasselli planari e il range di dimensioni dei tasselli sono stati gli obiettivi principali dell'agent based system; tuttavia, la possibilità di interagire con il comportamento strutturale e con altri parametri costruttivi, quale forma e spessore dei pannelli, sarebbe la conseguenza naturale del percorso esposto.

BIBLIOGRAFIA

Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D. & Williams, C., 2014. *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Londra: Routledge.

Akinade, O. et al., 2017. Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills. In: *Waste Management*. s.l.:s.n., pp. 3-13.

Alvarez, M. et al., 2019. The BUGA Wood Pavilion – Integrative Interdisciplinary Advancements of Digital Timber Architecture. *Ubiquity and Autonomy - 39th ACADIA Conference 2019At: The University of Texas at Austin - School of Architecture*.

Amiri, A., Ottelin, J., Sorvari, J. & Junnila, S., 2020. Cities as carbon sinks - classification of wooden buildings. In: *Environmental Research Letters 15*. s.l.:IOP Publishing.

Bechert, S. et al., 2018. Structural Performance of Construction Systems for Segmented Timber Shell Structures. In: *Proceedings of the IASS Symposium 2018*. Boston: s.n.

Block, P. & Ochsendorf, s.d. *As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches*. s.l.:s.n.

Block, P. et al., 2020. Redefining structural art: strategies, necessities and opportunities. *Structural Engineer*, pp. 66-72.

Carmo, M., 2011. *The Alphabet and the Algorithm*. Regno Unito: MIT Press.

Colchester, J., 2016. *Systems + Complexity - An Overview*. s.l.:s.n.

Dorigo, M. & Bonabeau, E., 1999. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. s.l.:OUP USA.

Frazer, J., 1995. *An Evolutionary Architecture*. Regno Unito: Architectural Association.

Groenewolt, A., Schwinn, T., Nguyen, L. & Menges, A., 2017. *An interactive agent-based framework for materialization-informed architectural design*. s.l.:Springer Science+Business Media.

Guy, B. & Ciarimboli, N., 2008. *Design for Disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building*. s.l.:Hamer Center.

Johnson, S., 2012. *Emergence: the connected lives of ants, brains, cities and software*. Regno Unito: Scribner.

Kiendl, J. M., 2011. *Isogeometric Analysis and Shape Optimal Design of Shell Structures*, s.l.: Technischen Universität München.

Knippers, J. & Li, J.-M., 2015. Pattern and Form - Their Influence on Segmental Plate Shells. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*.

Knippers, J. & Li, J.-M., 2015. Segmental Timber Plate Shell for the Landesgartenschau Exhibition Hall in Schwäbisch Gmünd—the Application of Finger Joints in Plate Structures. *International Journal of Space Structures*, pp. 123-140.

Krieg, O. et al., 2014. Biomimetic Lightweight Timber Plate Shells: Computational Integration of Robotic Fabrication, Architectural Geometry and Structural Design. In: *Advances in Architectural Geometry*. s.l.:Springer, pp. 109-127.

La Magna, R. et al., 2013. From Nature to Fabrication: Biomimetic Design Principles for the Production of Complex Spatial Structures. *International Journal of Space Structures*, pp. 27-39.

Manahl, M. et al., 2012. Ornamental Discretisation of Free-Form Surfaces: Developing digital tools to integrate design rationalisation with the form finding process. In: *Beyond Codes and Pixels: Proceedings of the 17th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*. Hong Kong: Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), pp. 347-356.

Mesnil, R., 2017. *Structural explorations of fabrication-aware design spaces for non-standard architecture*.

Murphy, D., 2016. *Last Futures: Nature, Tecnology and the End of Architecture*. Regno Unito: Verso.

Pasquinelli, M., 2019. *3000 Years of Algorithmic Rituals: The Emergence of AI from the Computation of Space*, s.l.: e-flux journal #101.

Reynolds, C., 1987. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 25-34.

Rudofsky, B., 1987. *Architecture without Architecture*. Regno Unito: University of New Mexico Press.

Schwinn, T., Krieg, O. D. & Menges, A., 2014. Behavioral Strategies: Synthesizing design computation and robotic fabrication of lightweight timber plate structures. In: *Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*. Los Angeles: ACADIA, pp. 177-188.

Russell, S. & Norvig, P., 2010. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. s.l.:Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.

Stavric, M., Manahl, M. & Wiltsche, A., 2014. Discretization of double curved surfaces. In: *Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference*. s.l.:s.n., pp. 133-140.

Stavric, M. & Wiltsche, A., 2011. *Ornamental Plate Shell Structures*, s.l.: s.n.

Tagliaboschi, E. V., 2020. *Hexbox Canopy, A Rapid Assembly Segmented Timber Shell with Wedge Joints*, s.l.: Università di Pisa.

Umemoto, N. & Reiser, J., 2006. *Atlas of novel tectonics*. New York: Princeton Architectural Press.

Zevi, B., 2009. *Saper vedere l'architettura. Saggio sull'interpretazione spaziale dell'architettura*. Italia: Einaudi.

SITOGRAFIA

The Efficient Engineer. (2021). *Understanding the Finite Element Method* [Online Video]. 27 Aprile.
Disponibile su: <https://youtu.be/GHjopp47vvQ>
(Accesso: 21 Giugno 2022)

Long Nguyen. (2018). *C# Scripting and Plugin Development for Grasshopper* [Online Video]. 4 Maggio.
Disponibile su:
https://www.youtube.com/playlist?list=PLapoQ_9M-ujfYGOsZProIXPGx-HRfjJ9C
(Accesso: 31 Marzo 2022)

