

# BRANCH MAKING SHELLS

*Applicazione di sistemi multi-agente alla formazione  
di strutture monosuperficie con topologia ramificata*



ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

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

TESI DI LAUREA IN ARCHITETTURA E COMPOSIZIONE ARCHITETTONICA III

# BRANCH MAKING SHELLS

*Applicazione di sistemi multi-agente alla formazione  
di strutture monosuperficie con topologia ramificata*

Relatore: Prof. Alessio Erioli

Candidata: Ilaria Tommasi

Anno Accademico 2019/2020

Sessione straordinaria



# INDICE

---

<b>ABSTRACT</b>	<b>3</b>
<b>1 INTRODUZIONE</b>	<b>5</b>
<b>2 INQUADRAMENTO TEORICO</b>	<b>11</b>
2.1 Emergenze	12
2.2 Strutture a guscio	16
<b>3 SISTEMA DIGITALE</b>	<b>23</b>
3.1 Algoritmo di Space Colonization	26
3.2 Prime definizioni	30
3.3 Punti attrattori	36
3.4 Superfici guida	44
3.5 Distribuzione dei punti	48
3.6 Sviluppo del sistema su superficie	52
3.7 Post produzione	64
3.8 Valutazione dei risultati	68
<b>4 TECNOLOGIA COSTRUTTIVA</b>	<b>77</b>
4.1 Legno	78
4.2 Struttura	84
4.3 Rivestimento	92
<b>5 APPLICAZIONE ARCHITETTONICA</b>	<b>99</b>
<b>CONCLUSIONI</b>	<b>112</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>114</b>



# ABSTRACT

---

Con questa tesi si studiano le potenzialità di un agent-system per la generazione di strutture monosuperficie con topologia ramificata, con l'intento di generare architetture inseribili in contesti esistenti. Gli agenti agiscono leggendo informazioni date dall'ambiente e dal sistema stesso, adattandovi parametri di comportamento.

Il sistema creato parte dalle logiche dell'algoritmo di Space Colonization (utilizzato per simulare la crescita di strutture ramificate presenti in natura), basandosi quindi su punti attrattori nello spazio che guidano lo sviluppo di ramificazioni.

Lo studio si è concentrato sull'applicazione del sistema lungo superfici modellate sfruttando le potenzialità del territorio. L'analisi strutturale di queste, fornisce dati che influenzano la distribuzione dei punti, quindi lo sviluppo e la variabilità del pattern (direzionalità, frequenza e angolo di ramificazione) in funzione delle logiche costruttive proposte.

La complessità e variabilità del pattern generato, applicato a superfici a doppia curvatura non consente una standardizzazione degli elementi costruttivi: sono perciò state prese in considerazione diverse possibilità, cercando compromessi tra semplicità esecutiva ed estetica. Si è scelto un sistema materiale che lavora per elementi discreti, traducendo le tracce digitali in una tettonica organizzata in elementi curvi in legno collegati ai nodi con pezzi metallici.



# **1 INTRODUZIONE**



fig. 1.1\_ *Ipomoea*, *Convolvulaceae* (Twining plant)

fig. 1.2\_ *Clematis*, *Ranunculaceae* (Leaf-climber)

fig. 1.3\_ *Cucumis*, *Cucurbitaceae* (Tendril-bearer)

L'idea di questa tesi nasce dall'interesse sul legame tra architettura e contesto circostante: per poter studiare un sistema generativo che dialogasse con l'esistente, traendone informazioni per uno sviluppo adeguato e conferendovi possibilità aggiuntive in termini di spazi o connessioni.

La creazione del sistema è partita dall'osservazione di ciò che avviene in natura, cercando organismi biologici in cui è evidente il legame forte tra contesto e evoluzione del sistema stesso.

Le piante rampicanti sono un esempio in cui il contesto esistente è necessario per la sopravvivenza, poiché costituisce un supporto fisico indispensabile per la crescita in altezza, quindi per avere una miglior esposizione alla luce.

Le tecniche utilizzate per l'ancoraggio sono diverse e in base ad esse ogni tipologia di pianta ha adeguate caratteristiche morfologiche e predilige un supporto differente. Le tipologie classificate da Darwin (1865) sono cinque: *Twining plants*, *Leaf-climbers*, *Tendril-bearers*, *Root-climbers* e *Hook-climbers*.

Le Twining plants (es. *Ipomoea*, *Dioscorea*), effettuando un movimento circumnutatorio con lo stelo



principale, riescono ad ancorarsi a supporti cilindrici di diametri proporzionali alla dimensione della pianta, mentre le Tendril-bearers (es. *Vite*, *Passiflora*) e le Leaf-climbers (es. *Clematis*, *Bauhinia*) hanno parti apposite della pianta dedicate all'ancoraggio (in questo caso su supporti di diametri ridotti), a cui si attorcigliano con lo stesso principio delle precedenti (Isnard et al. 2009).

fig. 1.4\_ *Parthenocissus*, Vitaceae (Root-climber)

fig. 1.5\_ *Uncaria*, Rubiaceae (Hook-climber)

Nelle Root-climbers (es. *Parthenocissus*, *Hedera*) invece sono presenti delle micro-radici che al contatto con superfici scabre aderiscono sia meccanicamente, sia chimicamente: in questo caso quindi la dimensione del supporto non ha rilevanza, infatti troviamo spesso questo tipo di pianta su pareti estese (Melzer et al. 2010).

Per quanto riguarda l'ultima categoria, le Hook-climbers (es. *Calamus*, *Uncaria*), si ha un tipo di supporto passivo, infatti lungo lo stelo sono presenti uncini che si agganciano alla vegetazione circostante (Isnard et al. 2009).

In generale il comportamento delle piante cambia in funzione della presenza o meno di un supporto. È stato osservato, principalmente nelle Root-climbers (*Monstera tenuis*), come vi sia una 'ricerca dell'oscu-



fig. 1.6\_ *Cuscuta*, *Convolvulaceae*

rità' prima di trovare un supporto, comportamento denominato «skototropism» (termine coniato da Strong e Ray nel 1975) o fototropismo negativo, associato alla ricerca degli alberi nella foresta, quindi alle zone in ombra; mentre una volta trovato il supporto la crescita inizia ad essere rivolta verso una fonte luminosa (fototropismo positivo). Comportamenti analoghi sono presenti anche in tipi di Twining-plants (*Ipomea phillomega*), che producono stoloni (rami laterali che si estendono sul suolo) in condizioni ombreggiate e germogli per la ricerca di un supporto in altezza in condizioni soleggiate (Gianoli 2015).

Un altro criterio per la scelta di direzione di crescita è utilizzato dalla specie parassita *Cuscuta*, che necessita di piante ospiti per la sopravvivenza, da cui assorbe i nutrienti necessari. Si è osservato che queste specie crescono verso regioni che emettono radiazioni *red / far-red*, indicanti la presenza di organismi con elevate quantità di clorofilla. La pianta è inoltre in grado di seguire segnali chimici volatili, localizzando le piante ospiti anche senza luce. L'alta specializzazione di queste piante è presumibilmente dovuta alla forte selezione di specie dovuta al comportamento parassita (Gianoli 2015).



L'osservazione di questi comportamenti ha portato allo studio di un sistema generante strutture ramificate, il cui sviluppo si basa sulla competizione spaziale tra rami stessi e con comportamenti variabili in funzione delle informazioni fornite dall'ambiente, con un'ottica di adattamento in base alle esigenze strutturali e geometriche.

La crescita lungo supporti delle piante rampicanti è stata la fonte principale di ispirazione per la modellazione delle superfici 'rampicanti' su ipotetici contesti esistenti, partendo dall'ipotesi che questi siano in grado supportare efficacemente gli sforzi dovuti alla nuova struttura.

Il design delle strutture, pensate non solo come coperture, ma anche con zone percorribili, porta quindi a possibilità aggiuntive in termini di creazione di spazi e connessione tra questi.

*fig. 1.7\_ Effetti sul fototropismo delle piante rampicanti. Sistema di modellazione interattiva delle piante rampicanti (Hädrich et al. 2017)*



# **2 INQUADRAMENTO TEORICO**

## 2.1 EMERGENCE

---

*«Slime mold assemblages, [...] formation of city neighborhoods, [...] distributed network of human brain.*

*—Johnson, 2001*

*What features do all these systems share? In the simplest terms, they solve problems by drawing on masses of relatively stupid elements, rather than a single, intelligent 'executive branch'. They are bottom-up systems, not top-down. They get their smarts from below. In a more technical language, they are complex adaptive systems that display emergent behavior. In these systems, agents residing on one scale start producing behavior that lies one scale above them: ants create colonies; urbanites create neighborhoods; simple pattern-recognition software learns how to recommend new books. The movement from low-level rules to higher-level sophistication is what we call emergence.»*



*fig. 2.1\_ Esempio di sistema emergente in natura: colonia di formiche.*

Con 'emergence' definiamo il fenomeno caratteristico dei sistemi complessi, dove l'interazione tra diverse entità, che seguono regole semplici locali, senza un controllo di ordine superiore, porta alla comparsa di proprietà globali, non riducibili ai singoli costituenti del sistema.

L'interazione dei singoli componenti di un sistema, tra loro e con l'ambiente circostante, genera processi di auto-organizzazione che portano alla creazione di un'intelligenza collettiva (Swarm intelligence), proprietà riconoscibile in sistemi biologici dove non vi è un controllo centralizzato, per esempio nelle colonie di insetti, negli stormi di uccelli in volo o nei banchi di pesci.

Le proprietà di questi sistemi sono quindi: l'assenza di un ente coordinatore, la limitatezza delle capacità dei singoli individui e l'ignoranza di questi rispetto al sistema globale.

Lo studio di questi sistemi avviene attraverso i Multi-Agent Systems.

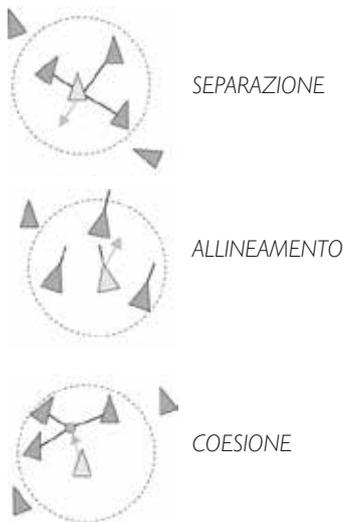
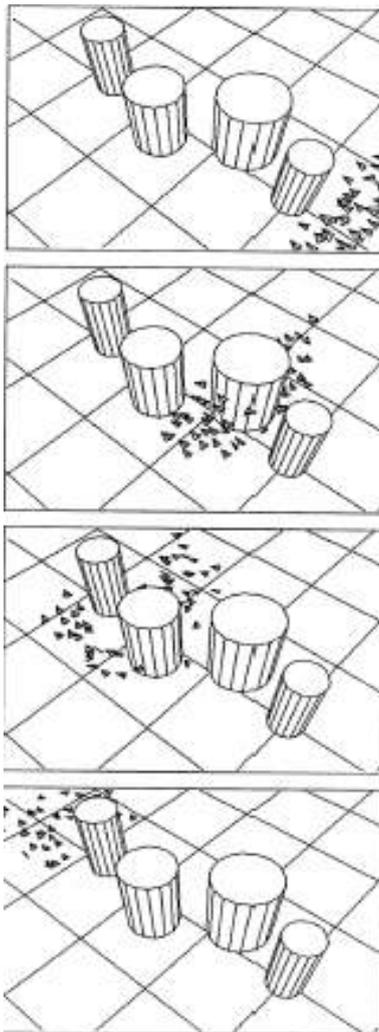


fig. 2.2\_ Diagrammi illustranti le regole di comportamento del sistema dei Boids di Craig Reynolds e immagini della simulazione



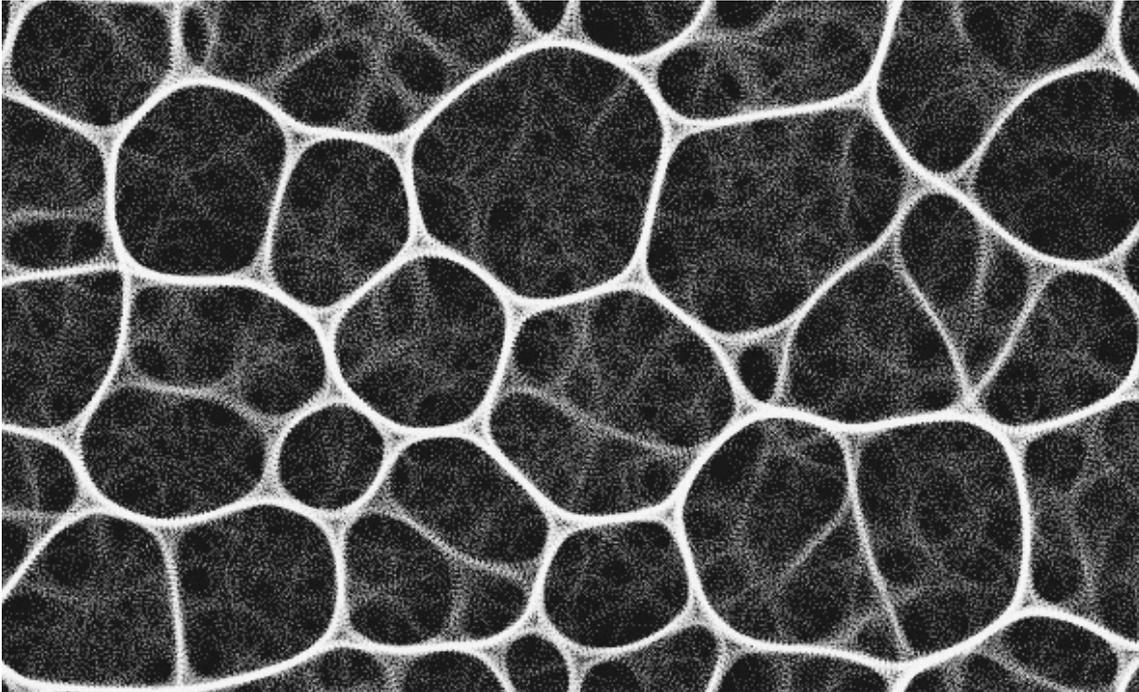
## MULTI-AGENT SYSTEMS

I sistemi multi-agente sono modelli digitali utilizzati per lo studio dei fenomeni emergenti presenti in natura. Essi sono costituiti da agenti elementari interagenti tra di loro situati in un certo ambiente. Un agente è un'entità caratterizzata dal fatto di essere, almeno parzialmente, autonoma, che agisce secondo regole locali semplici, in base a ciò che percepisce dell'ambiente esterno. L'interazione tra un elevato numero di agenti quindi dà luogo a proprietà collettive emergenti.

Si possono individuare due modelli di interazione: diretta, studiato da Craig Reynolds (1986), e indiretta, studiato da Jeff Jones (2010).

Craig Reynolds, con il Boids System, crea un software che simula il comportamento degli stormi di uccelli in volo. Ogni agente del sistema ha una visione limitata e il loro movimento dipende da tre comportamenti di base: separazione (sterzare per evitare di avvicinarsi eccessivamente ai vicini), allineamento (sterzare per allineare la direzione di movimento alla media di quelle dei vicini) e coesione (sterzare per avvicinarsi alla posizione media dei vicini). Gli agenti quindi percepiscono la presenza di vicini e ostacoli, agendo di conseguenza.

Le entità del sistema quindi non sono in grado di percepire il risultato generato dal movimento collettivo e non vi è alcun elemento 'ordinatore' di livello superiore, ma le interazioni e l'auto-adattamento a livello locale generano un risultato con un ordine riconoscibile, non prevedibile direttamente dagli input di partenza.



Jeff Jones invece, simulando il comportamento del *Physarum polycephalum*, studia un sistema in cui gli agenti comunicano tra loro in modo indiretto attraverso la modifica dell'ambiente: tale metodo di comunicazione è detto 'stigmergico'.

Ogni agente del sistema è in grado di lasciare un segnale (feromoni) nell'ambiente e tramite sensori fissi è in grado di percepirlo, direzionandosi verso le zone con segnale maggiore; ogni traccia ha una permanenza limitata (volatilità del segnale) e un grado di diffusione nello spazio limitrofo.

Dopo un certo numero di iterazioni il sistema tenderà a stabilizzarsi, facendo emergere percorsi critici, frutto della maggior concentrazione di segnale, quindi del maggior passaggio degli agenti.

fig. 2.3\_ Sistema multi-agente per la simulazione del comportamento del *Physarum polycephalum*. [01]

## 2.2 STRUTTURE A GUSCIO

Le strutture a guscio sono strutture portanti a lastra curva la cui rigidezza e resistenza agli sforzi dipendono sostanzialmente dalla forma geometrica. La conformazione di tali strutture infatti, permette la trasmissione dei carichi principalmente tramite sforzi longitudinali, consentendo l'uso di spessori molto sottili rispetto alle dimensioni e ai raggi di curvatura [02].

Le forme di strutture a guscio utilizzate tradizionalmente nella storia sono cupole e volte (a botte, a crociera, a vela o a padiglione), che permettevano di coprire grandi luci senza appoggi intermedi [03]. L'arco infatti è la forma che più si avvicina alla curva funicolare dei carichi, che perciò consente il principale funzionamento a compressione di tali strutture.

Il legame forte tra forma e statica della struttura di queste strutture, ha portato alla progettazione

fig. 2.1\_ Schema del filo con carichi, appeso agli estremi: comportamento funicolare

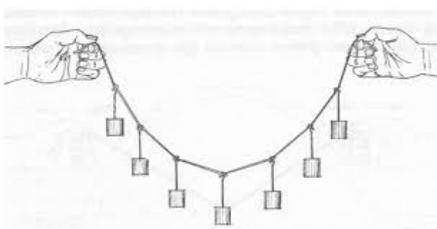




fig. 2.2\_ Frei Otto, Multihalle, Mannheim, 1975

fig. 2.3\_ Frei Otto, modello fisico per il progetto della Multihalle di Mannheim

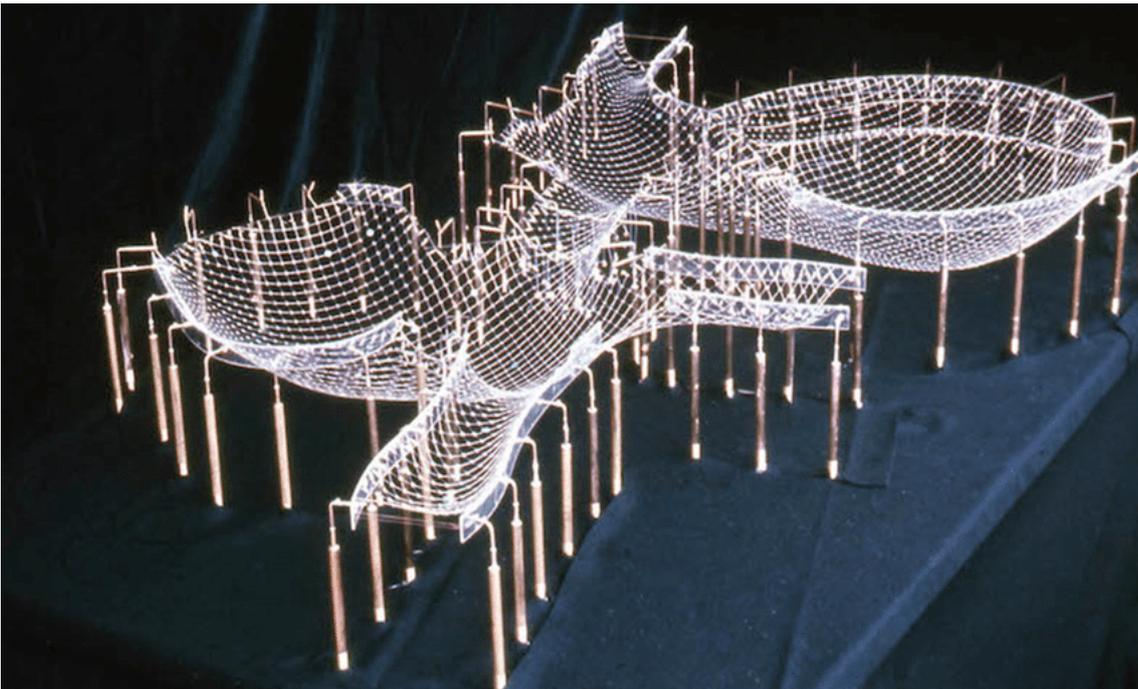




fig. 2.4\_ Heinz Isler, Sicli company building, Geneva, 1969

tramite modelli fisici per la ricerca della forma. Una superficie elastica senza alcuna rigidità a flessione, fissata agli estremi, sottoposta alla gravità, va a configurarsi in una forma funicolare secondo l'andamento degli sforzi (solo di trazione). Invertendo la forma si ottiene la configurazione della struttura, soggetta a sola compressione. Questo metodo è stato utilizzato per esempio da Heinz Isler, Antoni Gaudì e Frei Otto [03].

Le tecnologie costruttive per la costruzione di strutture a guscio non riguardano solo il cemento armato. Frei Otto apre la strada ad un nuovo modo di costruire col progetto della Multihalle di Mannheim (fig. 2.2), sperimentando la tecnica della gridshell, ovvero una struttura a guscio realizzata con un reticolo flessibile in legno.

Queste strutture vengono assemblate inizialmente in piano e successivamente sollevate e deformate fino al raggiungimento della forma desiderata, tramite il vincolo degli estremi e dei nodi [04].



Le evoluzioni tecniche e digitali hanno portato a diverse sperimentazioni sulla realizzazione di strutture a guscio, riguardo a materiali utilizzati e tecniche costruttive. Si riportano alcuni esempi che sono stati significativi durante la ricerca di tesi.

fig. 2.5\_ Marc Fornes, *Pleated Inflation*, Lycee Christian Bourquin, Argeles-Sur-Mer, 2013

*Pleated Inflation*, di Marc Fornes, come molti altri suoi progetti, è un padiglione autoportante realizzato tramite l'assemblaggio di elementi in lamiera sottile di alluminio.

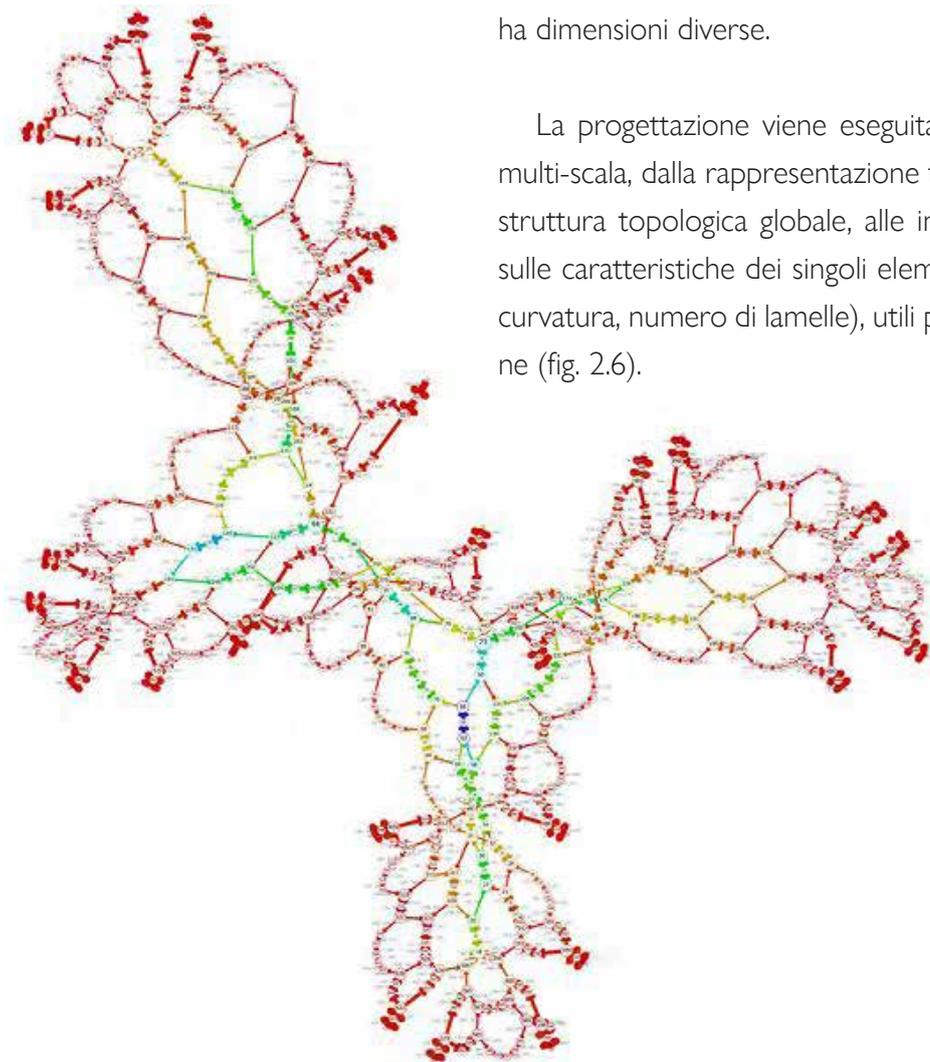
La geometria di base della struttura è costituita da una superficie a doppia curvatura, modellata ottimizzando la forma secondo i carichi, tramite processi di *Form-finding* (*'trovare la forma'* in base alla naturale conformazione assunta date le condizioni di carico). La struttura finale quindi lavora principalmente a compressione, come nei progetti citati precedentemente, a cui si giunge allo stesso obiettivo tramite l'utilizzo di modelli fisici appesi.

L'aggiunta delle pieghe conferisce una profondità alla superficie, rendendo la struttura più rigida senza bisogno di incrementare gli spessori [05].

Un altro progetto che rappresenta una diversa traduzione delle strutture a guscio è Grove, proposta progettuale (non realizzata) per la Biennale di Tallin del 2017, realizzato da Tom Svilans e Paul Poinet.

La struttura si basa su una superficie di base, anche in questo caso modellata tramite processi di Form-finding, a cui vengono applicati pattern di ramificazione rappresentanti la struttura in legno (fig. 2.8). La superficie di base quindi funge da guida per la mappatura e il controllo delle direzioni dei molteplici elementi in legno interconnessi che compongono la struttura. La struttura quindi presenta una rigidità globale data dalla doppia curvatura diffusa della superficie guida; a livello locale, in funzione dello sforzo in una determinata posizione, ogni elemento ha dimensioni diverse.

fig. 2.6\_ Grafo globale della struttura che rappresenta le caratteristiche degli elementi e le relazioni. La direzione di biforcazione è rappresentata da frecce, il cui spessore indica il numero di lamelle, il gradiente di colore invece rappresenta il grado di centralità di ogni elemento. (Poinet, 2019)

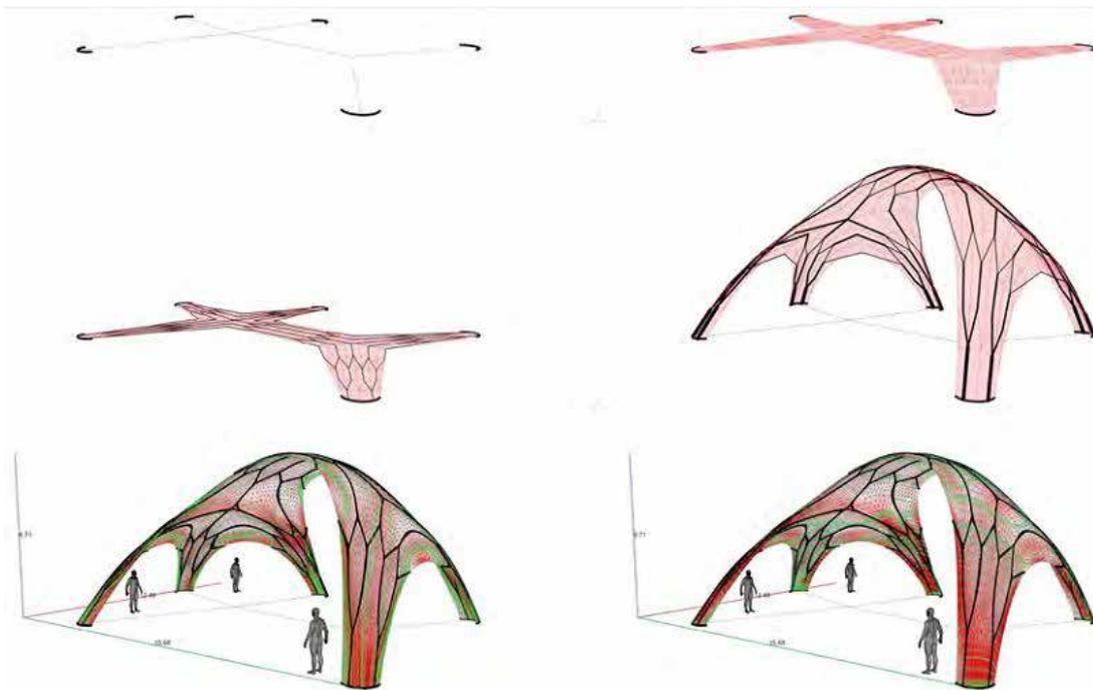


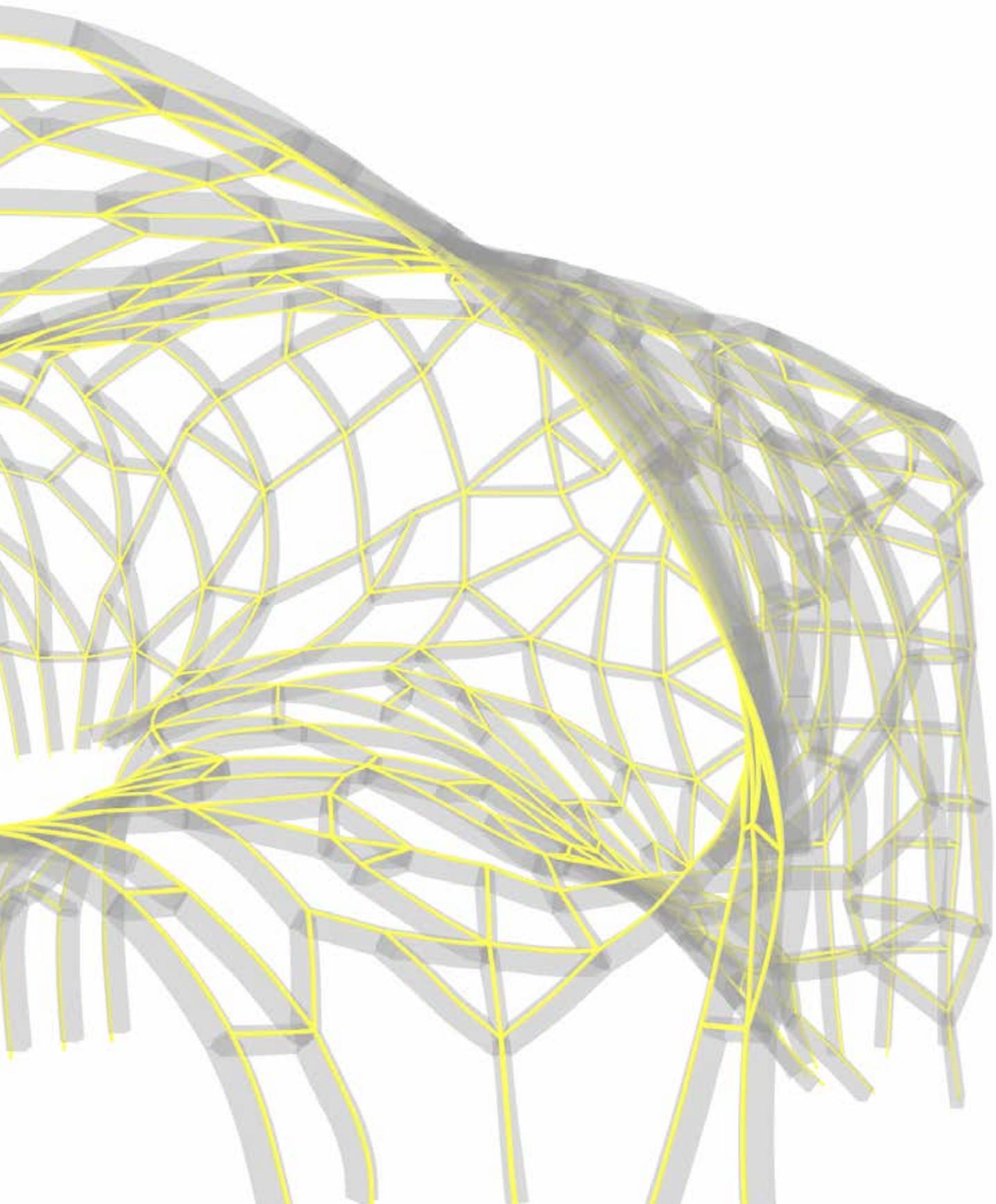
La progettazione viene eseguita tramite modelli multi-scala, dalla rappresentazione tramite grafi della struttura topologica globale, alle informazioni locali sulle caratteristiche dei singoli elementi in legno (es. curvatura, numero di lamelle), utili per la fabbricazione (fig. 2.6).



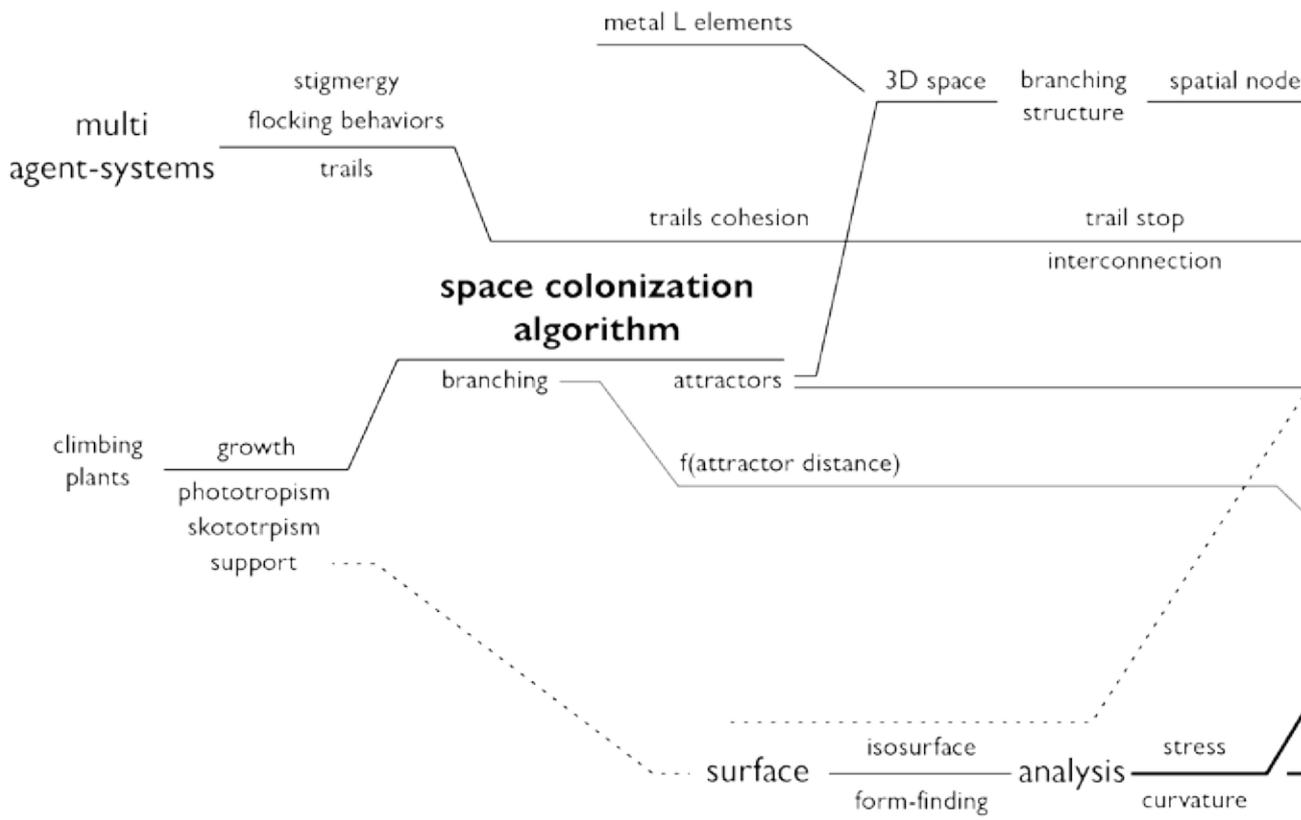
fig. 2.7\_ Paul Poinet, Tom Svilans, Grove, Tallinn Architecture Biennale Installation Competition, 2017

fig. 2.8\_ Posizionamento del pattern di ramificazione sulla mesh rilassata. (Poinet, 2019)

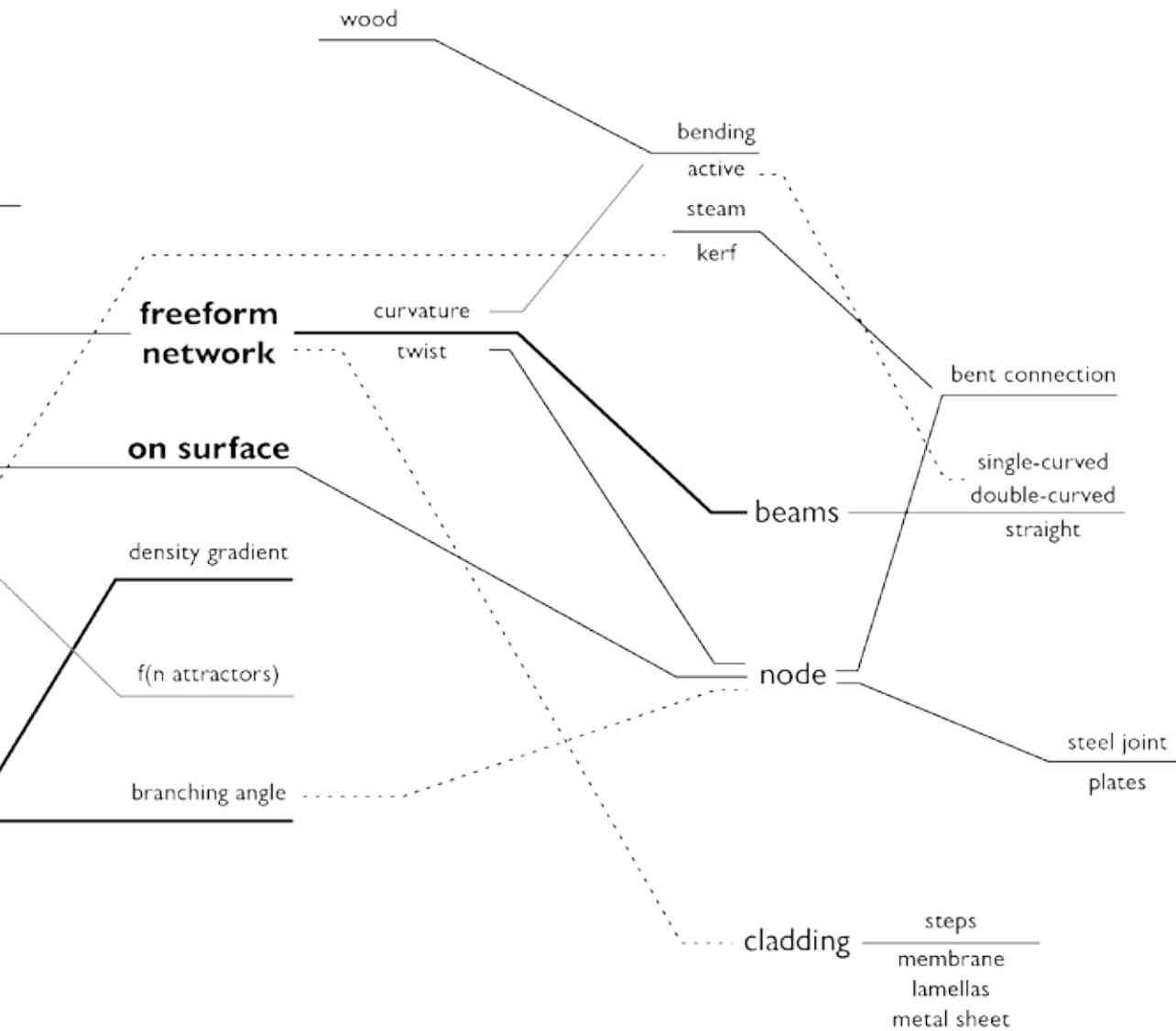




# **3 SISTEMA DIGITALE**



\_\_Road map del percorso di tesi



\_\_Software utilizzati: Rhino 6 + Grasshopper, Enscape, Visual Studio

\_\_Grasshopper plug-ins: Millipede, Kangaroo, Mesh Curvature, Karamba3D, froGH, Weavebird, GluLamb.

\_\_Linguaggio di programmazione per componenti personalizzati (Sistema digitale): C#

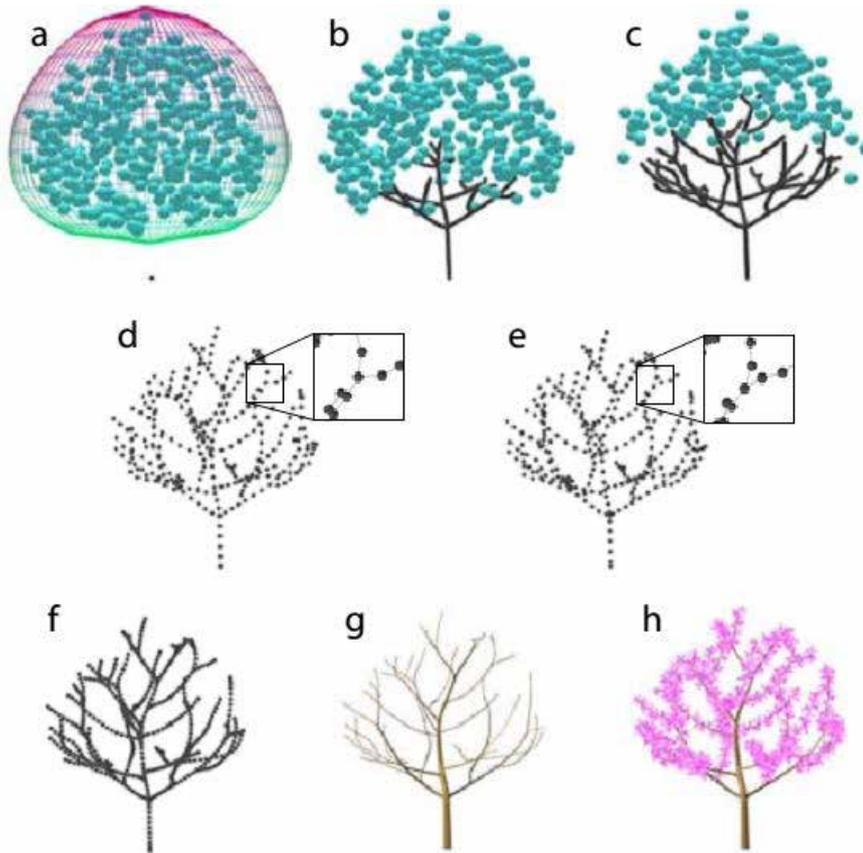
## 3.1 ALGORITMO DI SPACE COLONIZATION

---

L'algoritmo di Space Colonization è un algoritmo iterativo usato per la simulazione della crescita delle strutture ramificate presenti in natura, come nervature delle foglie, alberi e coralli [06].

La modellazione visiva della struttura degli alberi inizia con lo studio di Hisao Honda (1971), che propone l'utilizzo strutture ramificate ripetute, definite da un numero ridotto di caratteristiche geometriche (angoli di ramificazione e lunghezza dei rami).

Dal punto di vista biologico, la modellazione degli alberi come strutture ramificate ripetute è giustificato dal processo di sviluppo della pianta, che tipicamente parte da un singolo stelo avente foglie e germogli disposti secondo uno schema fillotassico. Lo schema regolare dei rami può rimanere visibile in piante giovani, ma la crescita delle piante è fortemente influenzata da fattori ambientali, che vanno a rompere la regolarità geometrica di partenza.

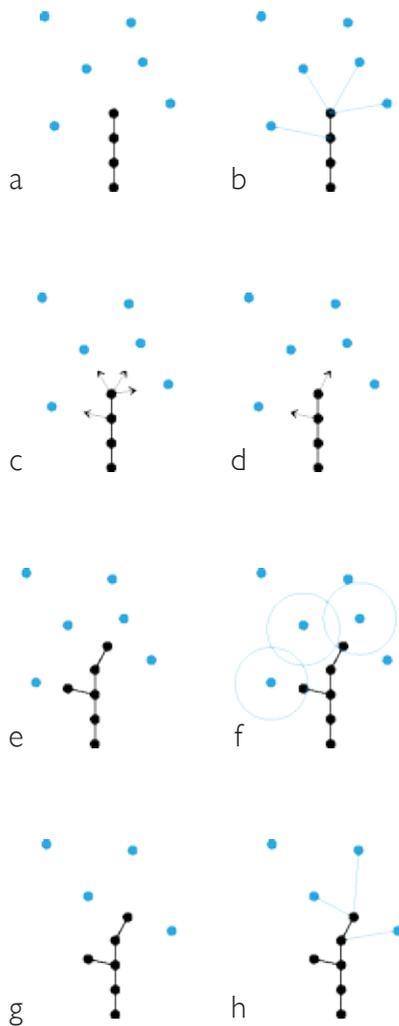


Runions, Lane e Prusinkiewicz (2007) propongono una modellazione basata sulla crescita delle strutture ramificate determinata dalla competizione tra i rami per l'occupazione dello spazio, simulando la competizione che realmente avviene in natura per l'esposizione alla luce dei rami, implementando in tre dimensioni l'algoritmo proposto per la generazione delle venature delle foglie (Runions et al. 2005).

L'idea chiave del processo è l'aggiunta iterativa di nuovi elementi (nodi) alla struttura dell'albero creata nelle iterazioni precedenti. Il processo è guidato dalla prossimità ai punti disposti nello spazio che rappresentano la disponibilità di spazio libero (Runions, 2008).

Si riporta l'illustrazione delle fasi chiave del procedimento completo di modellazione, partendo dalla disposizione dei punti nello spazio di ingombro della chioma dell'albero, alla modellazione finale del tronco e delle foglie (fig. 3.1).

fig. 3.1\_ Fasi chiave del metodo proposto.  
 a) Ingombro della chioma rappresentata con punti attrattori e nodo di partenza dell'albero;  
 b, c) Generazione della struttura dell'albero;  
 d) riorganizzazione dei nodi; e) Riposizionamento dei nodi: il dettaglio mostra la modifica dell'angolo di ramificazione; f) Suddivisione; g) Costruzione dei cilindri lungo le tracce; h) aggiunta di foglie.



Osservando più nel dettaglio la fase di generazione della struttura, si illustra il funzionamento dell'algoritmo per lo sviluppo planare delle venature delle foglie. L'algoritmo utilizza parametri definiti a priori, quali il raggio di influenza di ogni nodo ( $d_i$ ), la distanza tra i nodi successivi della struttura ( $D$ ) e una soglia per la rimozione dei punti attrattori ( $d_k$ ).

Le fasi di funzionamento sono elencate di seguito:

- a. Posizionamento dei punti attrattori
- b. Individuazione dei punti attrattori che influenzano ogni nodo, in base al raggio di influenza  $d_i$
- c. Calcolo della direzione media per ogni nodo verso gli attrattori che lo influenzano
- d. Calcolo delle posizioni dei nodi successivi in base alla lunghezza dei segmenti predefinita  $D$
- e. Posizionamento dei nodi successivi nella posizione calcolata
- f. Controllo delle distanze tra nodi e attrattori
- g. Rimozione punto attrattore, se la distanza dal nodo è minore della distanza di rimozione  $d_k$
- h. Ripartenza del processo dal passaggio b.

Il ramo quindi si ferma se non ha nuovi punti attrattori entro il raggio di influenza.

La variazione dei parametri del sistema produce risultati differenti, come si osserva dalle figure 3.2, 3.3, 3.4.

Il funzionamento dell'algoritmo introdotto è stato un punto di partenza per la definizione delle regole di sviluppo sistema digitale: non è stato utilizzato lo stesso algoritmo, ma ne vengono riprese le caratteristiche di base, quali l'utilizzo di punti attrattori per la definizione dello spazio e le direzioni di sviluppo, basandosi sul concetto di competizione spaziale delle ramificazioni.

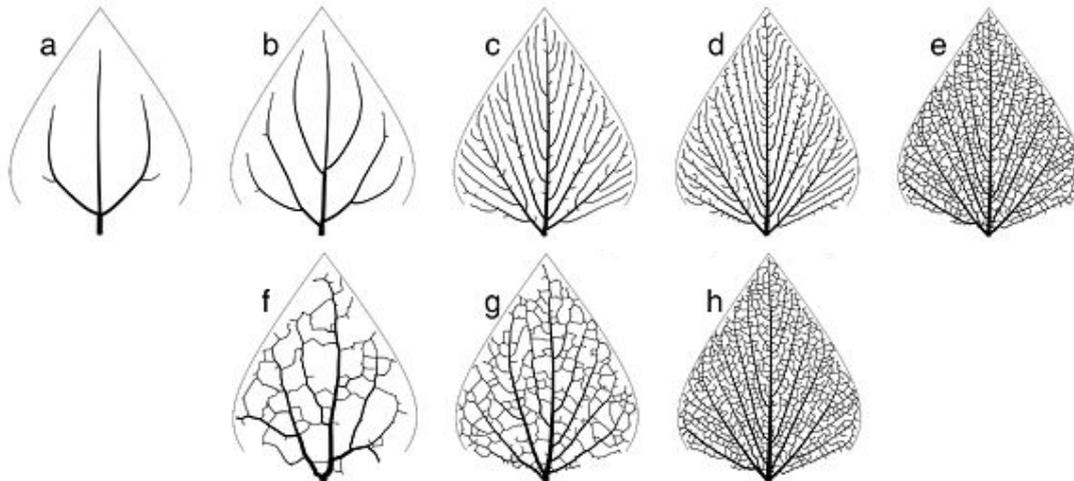


fig. 3.2\_ Esplorazione dei pattern generati dall' algoritmo in funzione delle variazioni dei parametri iniziali. a-e) Impatto della distanza di rimozione  $d_k$  sul pattern (decescente da sinistra a destra); f-h) impatto del numero di punti inseriti (crescente da sinistra a destra)

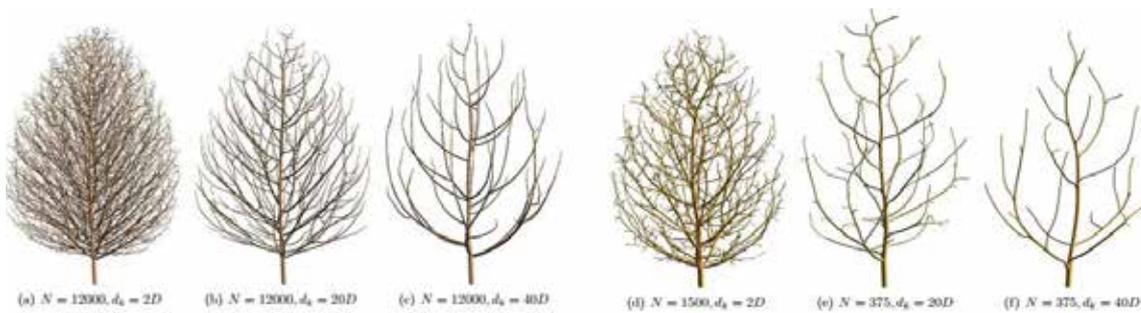


fig. 3.3\_ Impatto della variazione della distanza di rimozione dei punti  $d_k$  (a-c) e del numero di punti attrattori  $N$  (d-f) sulla forma finale dell'albero

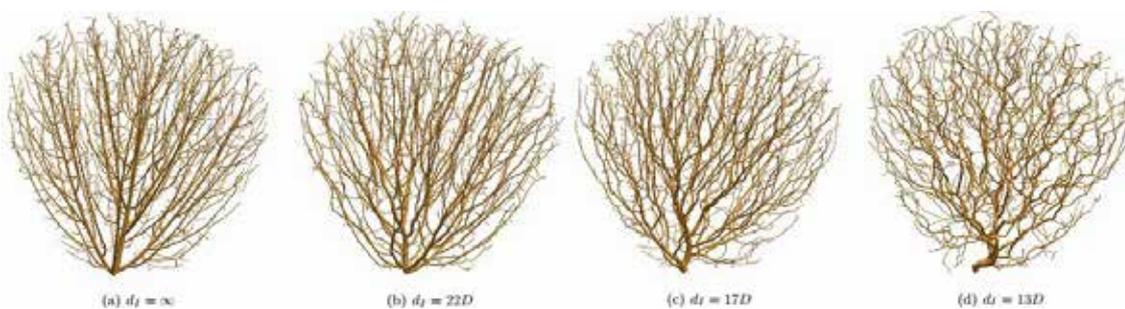


fig. 3.4\_ Impatto del raggio di influenza dei nodi sulla forma della chioma. Distanza definita in funzione della distanza tra i nodi adiacenti della struttura dell'albero

## 3.2 PRIME DEFINIZIONI



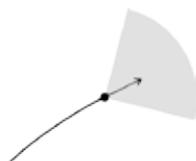
POSIZIONE



ETTORE VELOCITÀ



CONO VISIVO



TRACCIA

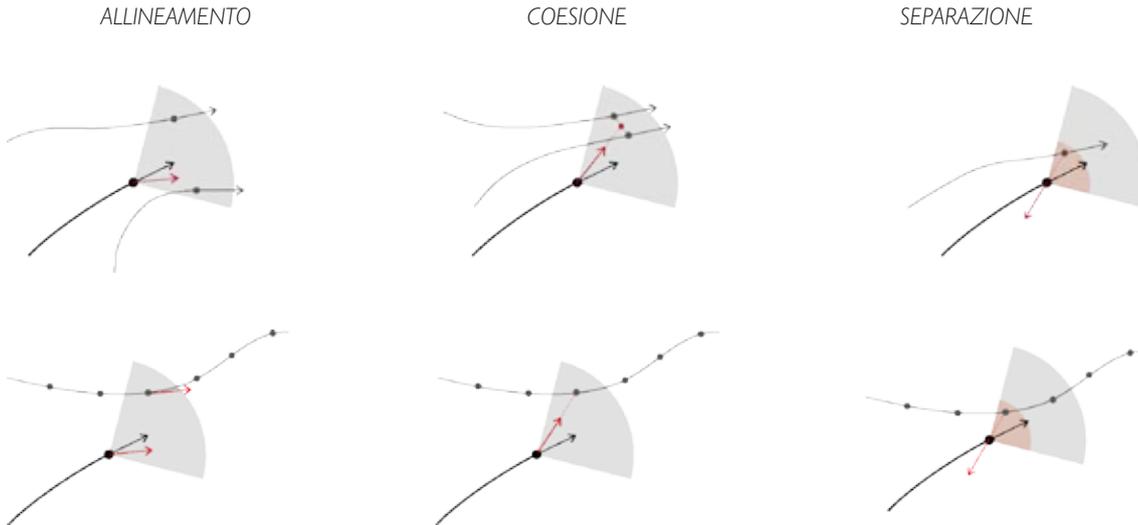
Il sistema digitale utilizzato è un Agent-System, le cui prime definizioni si basano sulle regole assunte da Craig Reynolds per il Boids System.

### AGENTI

Gli agenti del sistema sono definiti da posizione, velocità e cono visivo. Questi lasciano traccia della traiettoria percorsa nell'ambiente tramite una polilinea (unione delle successive posizioni assunte dall'agente stesso).

Il cono visivo è dato da angolo e raggio di visione e va a definire lo spazio entro cui gli agenti riconoscono gli elementi significativi per definire le proprie azioni.

Gli elementi significativi possono essere costituiti da altri agenti, punti delle tracce o altri elementi che definiscono l'ambiente di sviluppo.



### COMPORAMENTI

I comportamenti principali assunti dagli agenti sono quindi allineamento, coesione e separazione rispetto agli elementi visti nel raggio di vicinato (fig. 3.1).

Ad ogni iterazione viene effettuata una ricerca, entro il cono visivo definito, degli elementi significativi e in base a questi viene calcolato un vettore ‘desired velocity’ (dato dalla sommatoria dei vettori associati ai vari comportamenti) in funzione della scelte degli agenti, che sommata parzialmente alla velocità produce una variazione graduale nel movimento.

$$velocity = velocity \cdot 0.97 + desiredVelocity \cdot 0.03$$

Ad ogni iterazione quindi l’agente si muove nello spazio in base al vettore velocità definito (intensità massima fissata), registrando tramite le tracce le successive posizioni e direzioni assunte.

Ogni punto delle tracce depositate, comprensivo di vettore direzione (corrispondente alla tangente alla curva in quel determinato punto), diventa un elemento significativo, riconoscibile dagli agenti, rispetto cui vengono prese decisioni di movimento (fig. 3.2).

fig. 3.1\_ Diagramma illustrante i comportamenti rispetto agli altri agenti del sistema

fig. 3.2\_ Diagramma illustrante i comportamenti rispetto alle tracce depositate

$$alignment = (average\ direction) \cdot strength$$

$$cohesion = (average\ position - position) \cdot strength$$

$$separation = (position - element\ position) \cdot strength$$

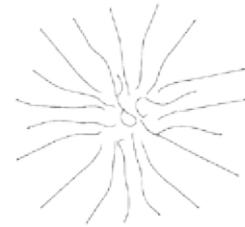
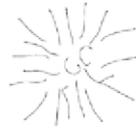
$$desiredVelocity = \Sigma(alignment, cohesion, sepaiaion)$$

## SISTEMA DIGITALE

### MOVIMENTO AGENTI

*n. start agents 20  
visual radius 6  
sepatation distance 4.8*

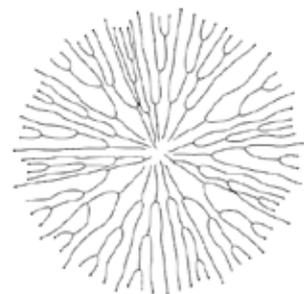
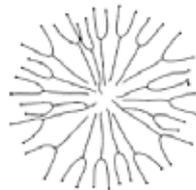
*separation strength 5  
alignment strength 2*



### RAMIFICAZIONE

*n. start agents 20  
visual radius 10  
sepatation distance 8*

*separation strength 5  
alignment strength 2  
branch length 4*



Osservati i primi risultati dati dai movimenti degli agenti, si è deciso di introdurre un comportamento di ramificazione delle tracce, aumentando gradualmente il numero di agenti, consentendo una maggior estensione nello sviluppo del sistema e una miglior occupazione dello spazio.

La ramificazione avviene a intervalli definiti da una lunghezza minima del ramo, con un angolo fissato.

Successivamente si eseguono dei test per osservare gli effetti delle variazioni dei diversi comportamenti rispetto agli agenti ('tip') o rispetto alle tracce ('trail').

Si utilizza un perimetro di confine per la determinazione di una variazione nei comportamenti. La curva è riconoscibile dagli agenti attraverso la definizione del punto più vicino alla loro posizione sulla curva stessa, che se visto entro il cono visivo, provoca una modifica dei parametri.

VARIAZIONE COMPORTAMENTI

n. start agents 20  
circle diameter 25  
branch length 3

visual radius 10  
separation radius 8

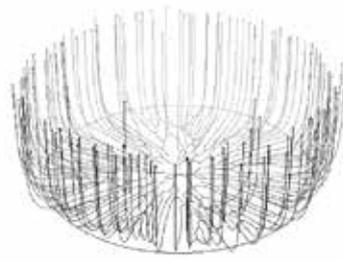
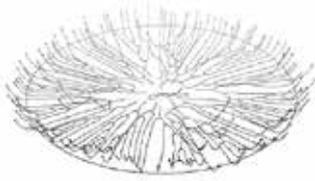
inside;  $z = 0$   
outside;  $z > 0$

alignment  
2

separation  
5

tip cohesion  
1

trail cohesion  
+ z  
1



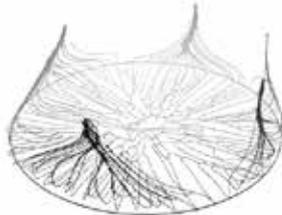
inside;  $z = 0$   
outside;  $z > 0$

alignment  
2  
2

separation  
5

tip cohesion  
1  
1

trail cohesion  
+ z  
1



inside;  $z = 0$   
outside;  $z > 0$

alignment  
2  
2

separation  
5

tip cohesion  
1  
1

trail cohesion  
+ z  
0.5  
1



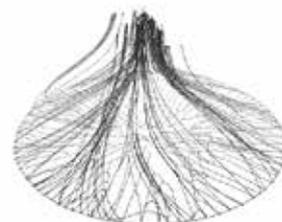
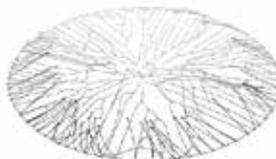
inside;  $z = 0$   
outside;  $z > 0$

alignment  
2  
2

separation  
5

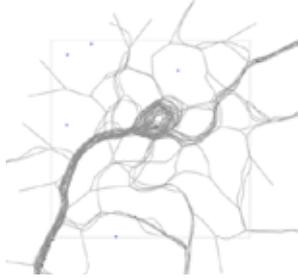
tip cohesion  
1  
1

trail cohesion  
+ z  
1  
1

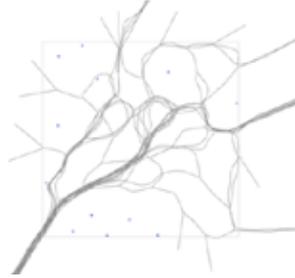


VARIAZIONE PESO VETTORE ALLINEAMENTO

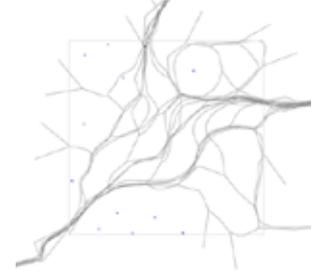
*alS 1 - coS 1 - sepS 0.1*



*alS 5 - coS 1 - sepS 0.1*

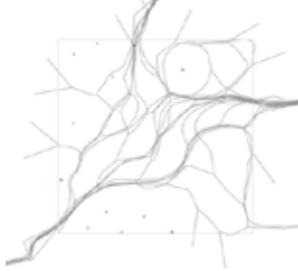


*alS 10 - coS 1 - sepS 0.1*

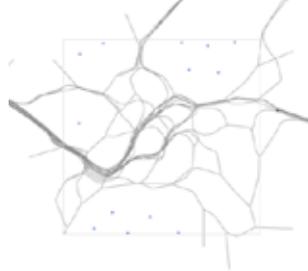


VARIAZIONE PESO VETTORE COESIONE

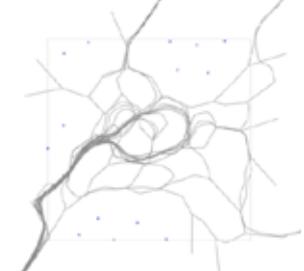
*alS 10 - coS 1 - sepS 0.1*



*alS 10 - coS 2 - sepS 0.1*

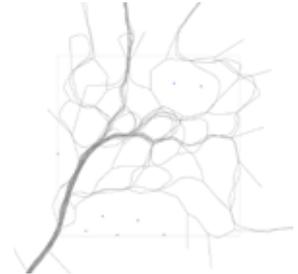


*alS 10 - coS 5 - sepS 0.1*

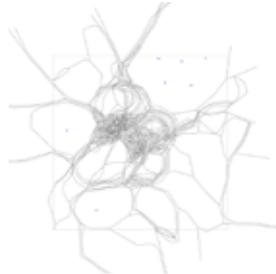


VARIAZIONE PESO VETTORE SEPARAZIONE

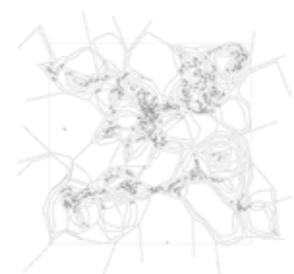
*alS 5 - coS 2 - sepS 0.1*



*alS 5 - coS 2 - sepS 1*



*alS 5 - coS 2 - sepS 5*



*n. start agent 1  
visual radius 6  
separation radius 0.6*

*Coefficienti moltiplicativi per i vettori  
corrispondenti ai comportamenti  
alS: alignment Strength  
coS: cohesion Strength  
sepS: separation strength*

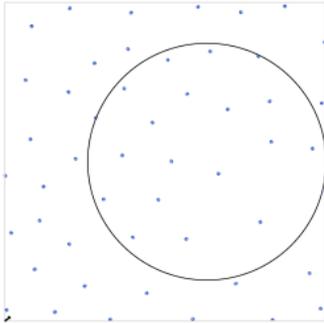
Con il perfezionamento delle regole del sistema e l'inserimento di punti attrattori (argomento trattato in modo più approfondito nel capitolo successivo), si osservano più nel dettaglio gli effetti dei comportamenti nel piano, limitandone l'applicazione solo rispetto alle tracce già presenti (non più anche agli agenti), sia variando i comportamenti globalmente, sia localmente, in funzione di curve chiuse.

Dai test si osserva che l'aumento del peso all'allineamento porta ad una maggior omogeneità dell'andamento delle tracce, aumentando la coesione vi è l'ingrossamento di alcuni percorsi, mentre con l'aumento della separazione vi è maggior occupazione dello spazio e minor raggruppamento delle tracce.

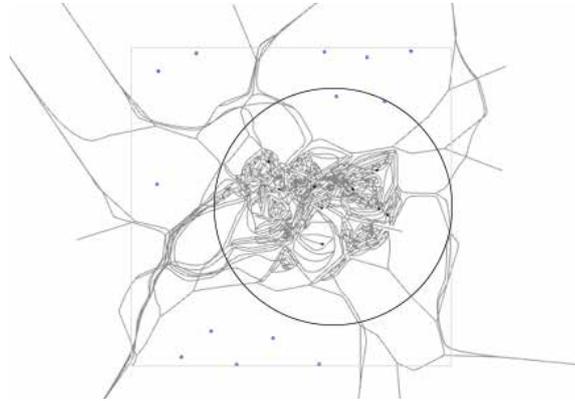
VARIAZIONE COMPORTAMENTI

n. start agent 1

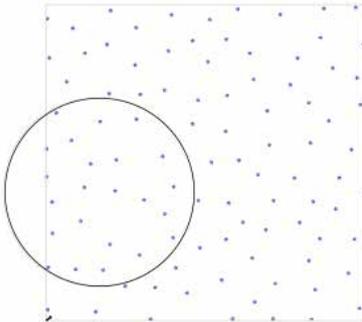
visual radius 6      separation radius 0.6  
 alignment  
 inside 10  
 outside 10



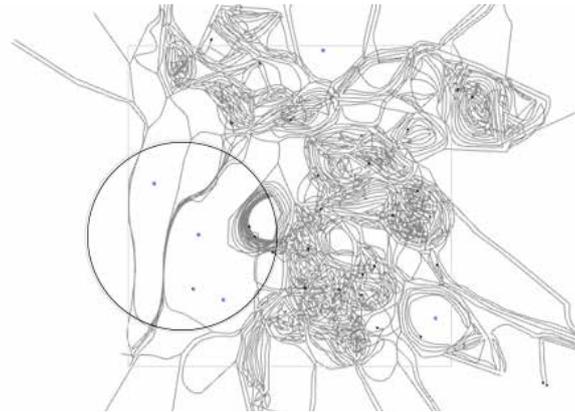
separation 2      cohesion 2      branching si  
 2      2      si



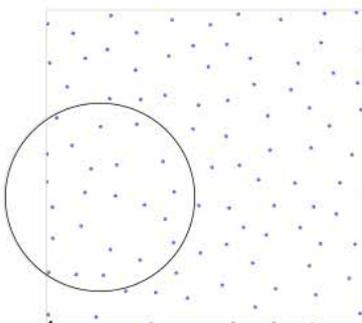
visual radius 4      separation radius 0.4  
 alignment  
 inside 10  
 outside 10



separation 1      cohesion 20      branching no  
 1      2      si



visual radius 4      separation radius 0.4  
 alignment  
 inside 10  
 outside 10



separation 0.1      cohesion 1      branching no  
 0.1      1      si



## 3.3 PUNTI ATTRATTORI

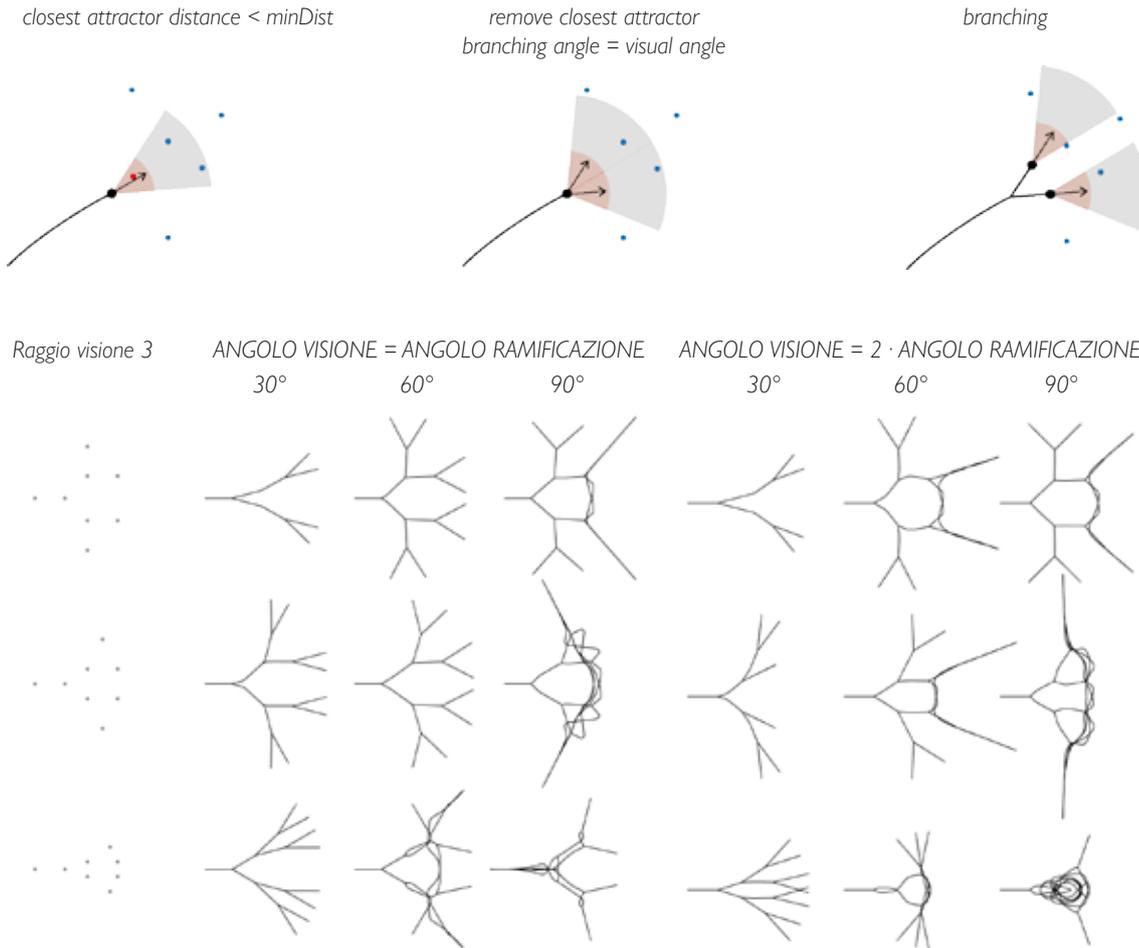
---

La definizione dell'ambiente per lo sviluppo del sistema viene perfezionata introducendo punti attrattori, come per l'algoritmo di Space Colonization.

La disposizione di tali punti diventa la variabile principale per lo sviluppo del sistema, poiché questi definiscono sia le direzioni di movimento degli agenti, sia la generazione di ramificazioni.

Man mano che gli agenti entrano in un definito raggio di vicinato rispetto ai punti attrattori, questi ultimi vengono eliminati, portando lo sviluppo del sistema verso zone non attraversate.

Gli attrattori possono essere dotati, oltre che di posizione, anche di vettore direzione, dato da un campo vettoriale globale, fungendo così da elemento significativo per il comportamento di allineamento degli agenti.



## RAMIFICAZIONE

L'agente può creare una ramificazione nel momento in cui viene a trovarsi ad una minima distanza da un punto attrattore e ne visualizza nel cono visivo almeno altri due, andando poi a definire le nuove direzioni di sviluppo.

Il raggio del cono visivo degli agenti è definito in base alla distanza tra i punti attrattori, mantenendo le due dimensioni simili.

Una prima regola imposta prevede una biforcazione con angolo costante e l'utilizzo dello stesso angolo, o angolo doppio per definire il cono visivo. Si osservano le tracce risultanti in tre diverse disposizioni di punti e con diversi angoli di ramificazione e visione.

fig. 3.1\_ Regola di ramificazione I: diagramma

fig. 3.2\_ Regola I. Variazione angoli.  
Parametri di comportamento utilizzati:  
aIS 2 - coS 0.5 - sepS 0

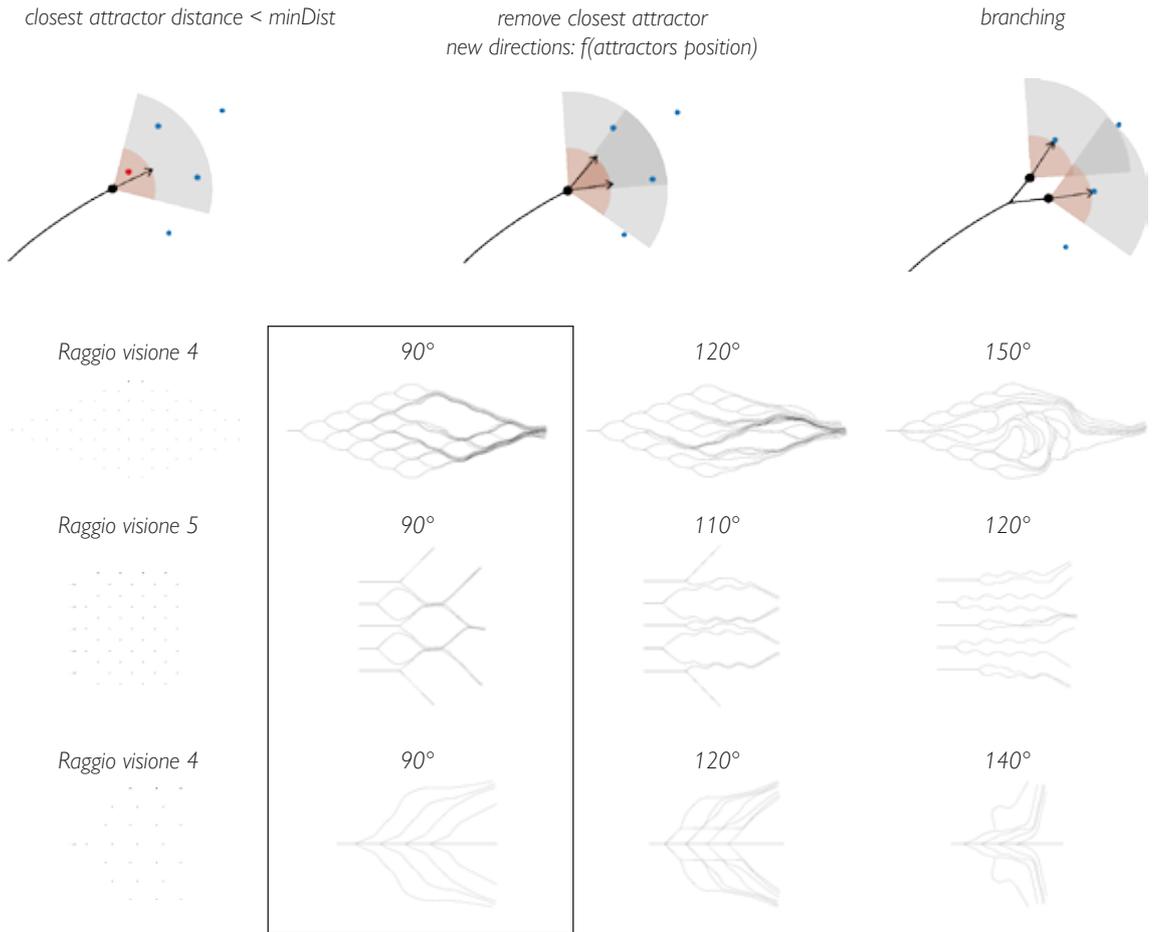


fig. 3.3\_ Regola di ramificazione II: diagramma

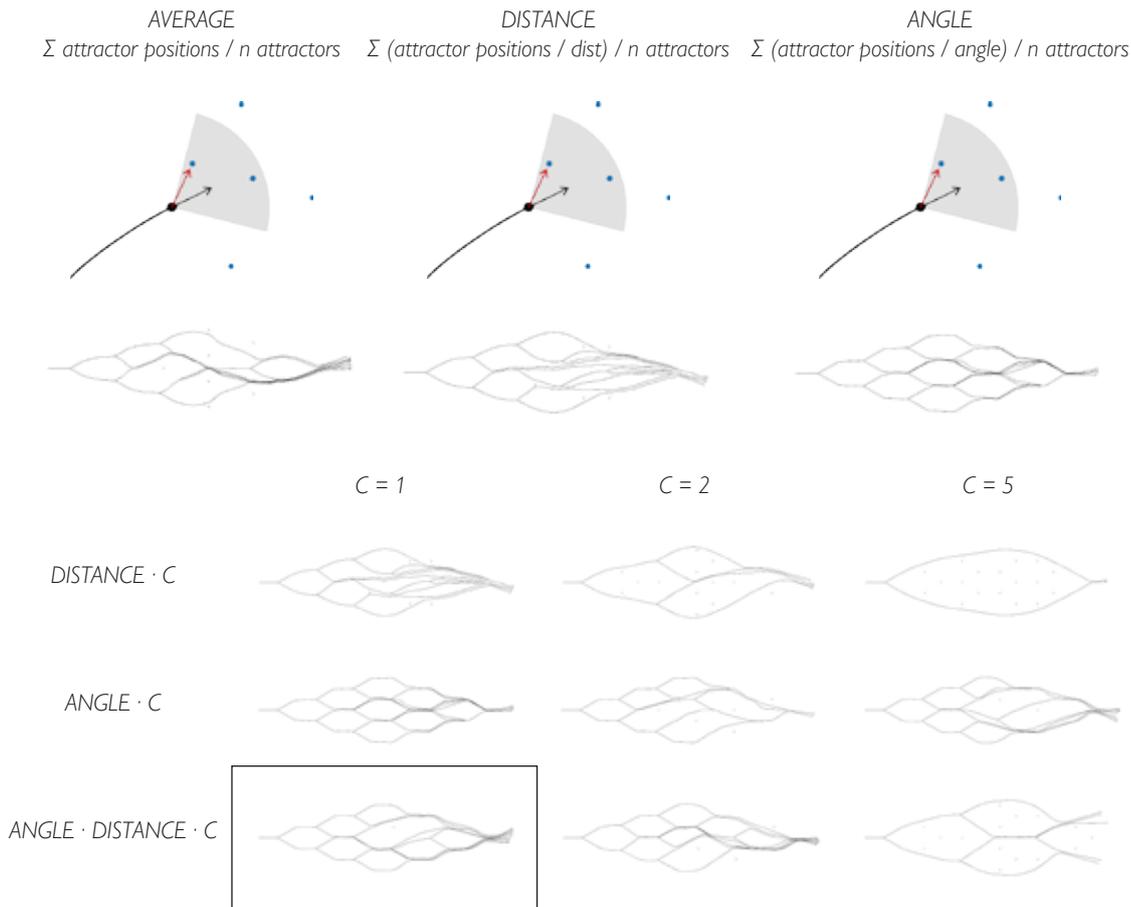
fig. 3.4\_ Test. Variazione angolo di visione.

Altri parametri utilizzati:  
aIS 5 - coS 0.5 - sepS 0.5

Per aumentarne la variabilità e l'adattabilità, il sistema è stato modificato il modo da definire le direzioni di sviluppo non più in modo fisso, ma dipendente dal numero e dalla posizione dei punti visti nel cono visivo. L'angolo che definisce il cono visivo è svincolato dall'angolo di ramificazione: si osservano le tracce risultanti con diverse variabili.

Si sceglie generalmente un angolo di visione di 90° per mantenere il più possibile un unico verso di percorrenza degli agenti, senza che tornino indietro verso il punto di partenza, creando un risultato meno disordinato.

Le possibilità di creazione di ramificazioni dipende soprattutto da quanto l'agente si avvicina ai singoli punti nello spazio e ciò è regolato dal calcolo delle successive direzioni di movimento: si riportano di seguito le regole di movimento esplorate.



### MOVIMENTO RISPETTO AI PUNTI

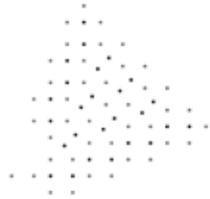
Il comportamento che gli agenti hanno rispetto ai punti attrattori è genericamente di coesione, ma questo può essere differenziato in base al criterio utilizzato per il calcolo della direzione. Questa può essere calcolata dando lo stesso peso ad ogni punto (AVERAGE), oppure dando un peso diverso in funzione della distanza tra punto e agente (DISTANCE) o dell'angolo che il punto ha rispetto alla direzione di movimento (ANGLE). Nei diagrammi è rappresentato in rosso il vettore a cui viene dato maggior peso (fig. 3.5).

Si osserva come per la terza opzione, il risultato finale sia totalmente prevedibile in base alla disposizione dei punti, vengono fatte inoltre prove con l'utilizzo di coefficienti che modulano la direzione finale (fig. 3.6).

fig. 3.5\_ Diagrammi di spiegazione delle varie tipologie di movimento e relativi test partendo dalla stessa disposizione dei punti

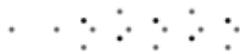
fig. 3.6\_ Modulazione dei comportamenti con l'uso di coefficienti

PATTERN REGOLARI SPAZIALI ESTESI



ANGLE · 5  
Angolo visione 90°  
Raggio visione 5  
a/S 5 - CoS 1 - sepS 0.5

PATTERN REGOLARI SPAZIALI SVILUPPATI LINEARMENTE

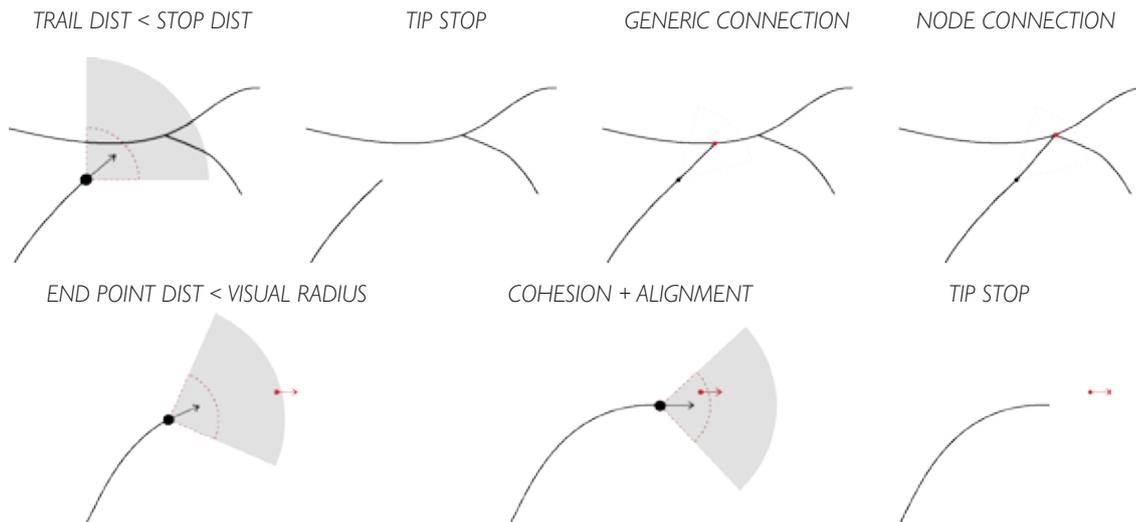


ANGLE · 10  
Angolo visione 100°  
Raggio visione 5  
a/S 5 - CoS 0.5 - sepS 0.5

fig. 3.7\_ Test sulle regole di ramificazione con disposizione spaziale regolare dei punti

Le regole vengono sperimentate sia su una disposizione planare di punti, sia su disposizioni spaziali (fig. 3.7), secondo griglie regolari, mostrando un buon controllo del risultato in base alla disposizione dei punti, soprattutto con il calcolo della direzione in funzione dell'angolo.

La regola portata avanti nella ricerca utilizza una media pesata sia in base alla distanza sia all'angolo, senza l'uso di coefficienti, mantenendo un controllo sul risultato, ma lasciando margine di scelta all'agente.



## INTERRUZIONE

Nei test precedenti si osservano sovrapposizioni delle tracce nelle zone in cui il numero di agenti di passaggio aumenta, ciò è di difficile traduzione geometrica. Vengono perciò aggiunti comportamenti per controllare lo sviluppo delle tracce, evitando i raggruppamenti eccessivi e dando una fine con punti definiti.

*fig. 3.8\_ Diagramma di spiegazione dell'interruzione delle tracce, rispetto ad altre presenti in prossimità*

*fig. 3.9\_ Diagramma di spiegazione di interruzione tracce con punti terminali*

### RISPETTO ALLE TRACCE

Per evitare raggruppamenti e sovrapposizioni di tracce viene introdotta una regola secondo cui le tracce si interrompono quando si avvicinano a una traccia già esistente, andando successivamente a cercare un punto di connessione, che possa essere genericamente lungo la traccia o al nodo, se si trova nelle vicinanze. In questo modo si va a creare una struttura interconnessa (fig. 3.8).

### PUNTI TERMINALI

Per dare invece una fine definita vengono introdotti dei punti nello spazio, dotati di vettore direzione, che, se visti dagli agenti entro il cono visivo, fungono da attrattori e nel momento in cui gli agenti si avvicinano oltre una certa soglia generano l'interruzione delle tracce (fig. 3.9).

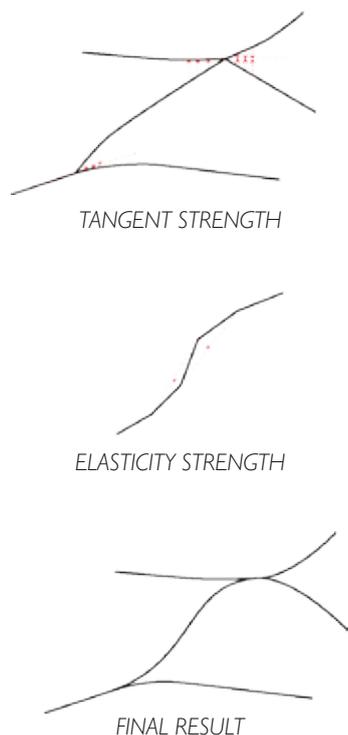


fig. 3.10\_ Diagramma di spiegazione della fase di post-produzione

## POST-PRODUZIONE

La connessione tra le tracce, dopo l'interruzione, non sempre avviene in modo raccordato, perciò viene introdotta una fase di post produzione.

Vengono definite le direzioni di raccordo ai nodi in base alla direzione assunta dall'agente in quella posizione, in modo tale che ogni traccia venga ridefinita secondo le direzioni di tangenza alle estremità.

Questo procedimento viene fatto in maniera iterativa dando capacità di movimento ai singoli punti delle tracce (fig. 3.10): i punti alle estremità tenderanno a portarsi verso la direzione tangente (*TANGENT STRENGTH*). Per non avere discontinuità e cambi di direzione netti, viene sommato per ogni punto un vettore che simula una forza di elasticità della curva, che tenderà quindi a raddrizzarla (*ELASTICITY STRENGTH*).

## DISPOSIZIONE SPAZIALE PUNTI

Parte della ricerca si concentra su uno sviluppo spaziale del sistema, disponendo i punti manualmente in funzione dell'andamento delle tracce.

Vengono creati ipotetici scenari per l'inserimento dell'architettura, dove le superfici fungono da ancoraggio, su cui vengono posizionati i punti di partenza e terminali per il sistema.

La geometria pensata per questo sviluppo è costituita da elementi metallici discreti con sezione a L, assemblati tra loro lungo le tracce. L'idea era consentire l'accostamento delle sezioni ai nodi, formando un '+' (fig. 3.11), generando torsioni lungo le tracce; non si riesce però a risolvere completamente quest'idea in modo pulito.

Si riportano alcuni esempi mantenendo solo le tracce per l'intera struttura (fig. 3.12).

fig. 3.11\_ Dettaglio dell'idea di nodo creato con le sezioni a L



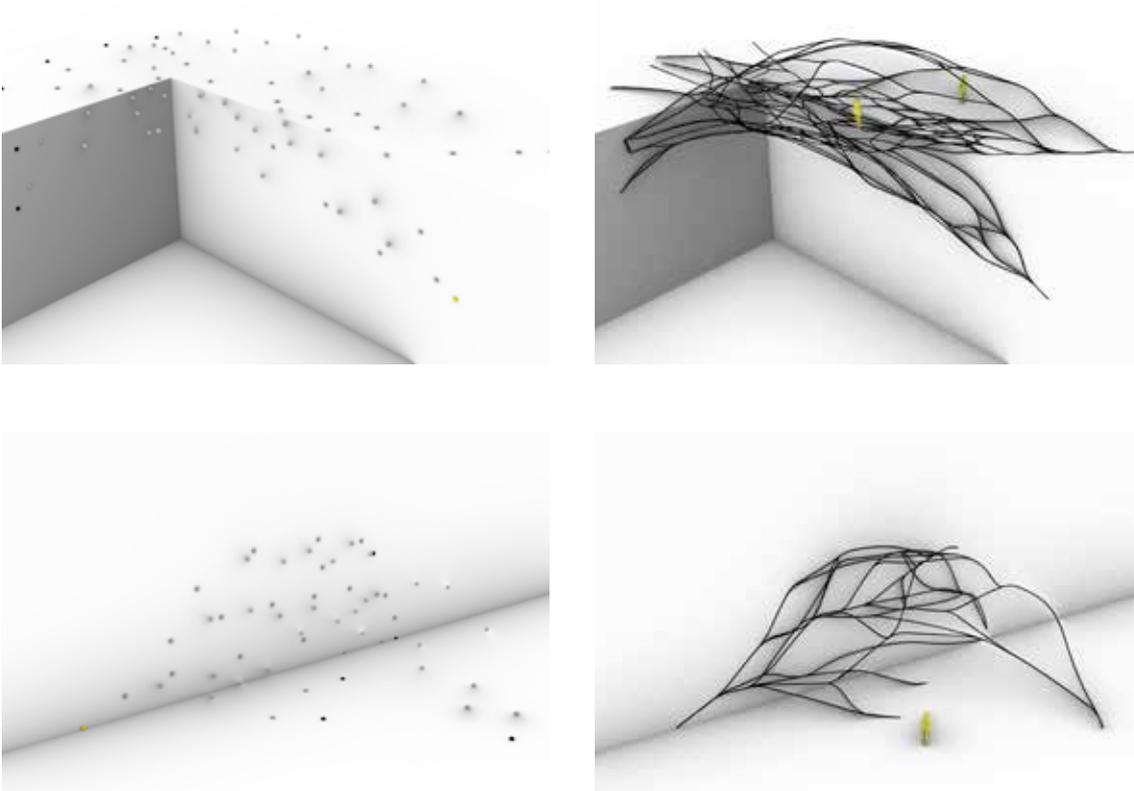


fig. 3.12\_ Esempi di risultati con disposizione spaziale dei punti

- Start points
- Attractor points
- End points

Come si osserva dalle immagini e dalla mancata risoluzione geometrica, lo sviluppo spaziale porta a evidenti criticità.

Il posizionamento manuale dei punti (di partenza, terminali e attrattori) costituisce la principale variabile di sviluppo del sistema, andando a ridurre notevolmente le potenzialità degli agenti di far emergere un proprio risultato, frutto dei singoli comportamenti.

Un altro tema che ci si trova ad affrontare è la gestione di nodi generici spaziali, non semplici da risolvere geometricamente in modo pulito.

Queste due problematiche hanno necessariamente provocato un cambio di direzione nella ricerca: si è scelto di imporre al sistema a uno sviluppo lungo superfici, semplificando quindi la gestione dei nodi e riducendo le variabili legate alla distribuzione dei punti, non più indotta manualmente.

## 3.4 SUPERFICI GUIDA

---

La modellazione delle superfici guida per lo sviluppo del sistema viene eseguita in due fasi: la prima tramite il *Millipede* (plug-in di Grasshopper) con il componente *Isosurface* e la seconda tramite Kangaroo (plug-in di Grasshopper), per un aggiustamento della forma in funzione della distribuzione dei carichi.

### ISOSURFACE

Il componente *Isosurface* utilizza l'algoritmo *Marching cubes* (William E. Lorensen, Harvey E. Cline, 1987) per estrarre una mesh poligonale di una iso-superficie da un campo 3D di valori scalari [07].

I valori possono essere definiti con l'utilizzo di funzioni nelle 3 dimensioni oppure, come in questo caso, utilizzando un componente precedente (*Geometry Wrapper*), tramite geometrie a cui sono associati valori di intensità e diffusione.

### DEFINIZIONE BOX

Viene definito un box di ingombro massimo e la risoluzione nelle tre dimensioni per la suddivisione del box in voxel (rappresentati con dei punti nell'immagine).

### GEOMETRIE E VALORI

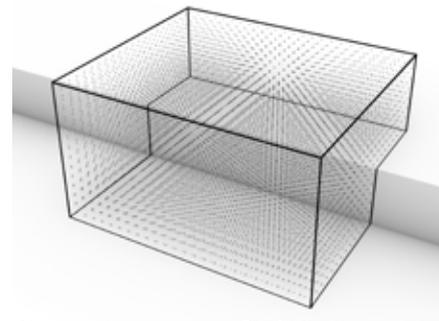
Le geometrie definite sono associate a valori di intensità (*power*) e di diffusione (*spread*). L'intensità, che può essere positiva o negativa, definisce un valore per ogni voxel che attraversa, mentre minore è il valore di diffusione, più tale valore si propagherà nei voxel circostanti.

Per ogni voxel si assume il valore maggiore in valore assoluto tra i contributi dati dalle singole geometrie.

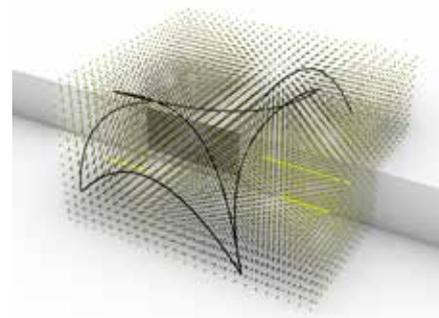
Con l'isovalore impostato si vanno a selezionare i voxel col valore corrispondente, che andranno a definire la mesh di output.

Tra le geometrie si inseriscono superfici 'di adesione', la cui intensità ha una diffusione solo locale (*spread* = 1); impostando l'isovalore simile all'intensità assunta per tali superfici, si avrà la mesh di output che aderisce parallelamente in quelle zone.

Le altre geometrie vengono scelte in funzione del design voluto per la struttura, concentrandosi sui collegamenti possibili all'interno del contesto.



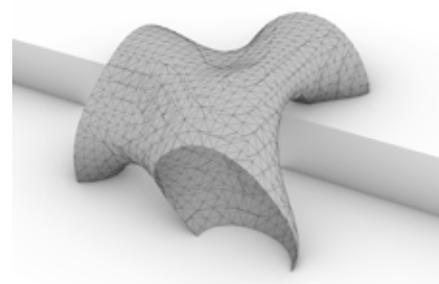
Dimensioni 21x21x15 m      Risoluzione 21x21x15

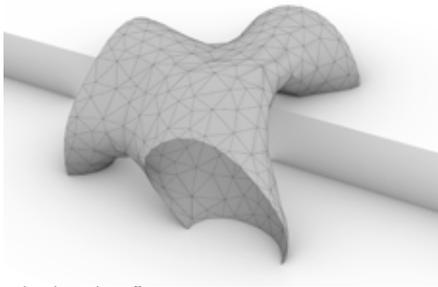


- GEOMETRIE
- *power* = + 130    *spread* = 1
  - *power* = + 150    *spread* = 0.06
  - *power* = -250    *spread* = 0.06

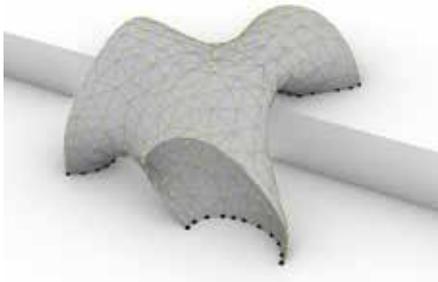


Isovalue = 127





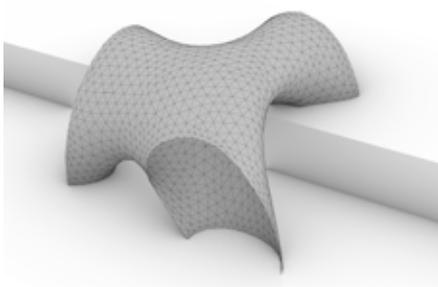
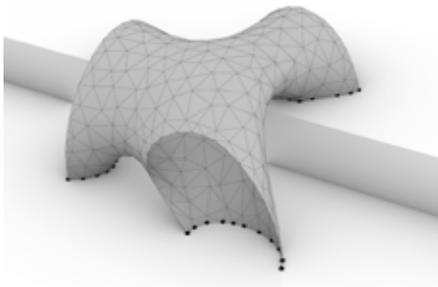
edge length = 2  
tolerance = 0.2



● Supports  
● Loads      Force Vector =  $0.78 \cdot z$

EDGE LENGTH  
Length Factor = 1      Strength = 10

HINGE  
Rest Angle = 0      Strength = 5



## OMOGENEIZZAZIONE TOPOLOGICA

La mesh che si ha come output dal componente *IsoSurface* non presenta una topologia uniforme, quindi si procede con una riorganizzazione topologica prima di procedere con le fasi successive.

Si utilizza il componente di Kangaroo *ReMesh*: impostando la lunghezza dei lati delle facce desiderata e una tolleranza, l'algoritmo va a ricostruire iterativamente la mesh secondo gli input.

## FORM-FINDING

Per la fase di Form-finding si esegue una simulazione con Kangaroo2, impostando i punti fissi di supporto e applicando forze opposte alla gravità in modo distribuito, facendo così riorganizzare la mesh, secondo vincoli interni, in base all'andamento degli sforzi.

I vincoli interni riguardano l'elasticità della struttura, quindi la resistenza alle deformazioni.

Viene impostata un fattore di lunghezza a riposo dei bordi delle facce della mesh e la forza che si oppone agli allungamenti (*EdgeLength*). Inoltre per evitare curvature eccessive concentrate viene aggiunto un vincolo riguardante l'angolo di piegatura tra le facce per ogni lato (*Hinge*), portandolo al minimo possibile.

Per migliorare la risoluzione si procede con una suddivisione triangolare delle facce (*Weaverbird's Loop Subdivision*).

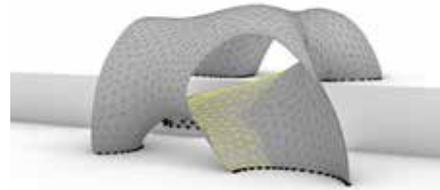
## ANALISI STRUTTURALE

L'analisi strutturale della superficie viene eseguita tramite il software Karamba3D, considerandola come struttura continua in cemento armato (spessore 20 cm), pur non essendo corrispondente alla struttura finale, poiché il risultato viene utilizzato solo come dato qualitativo per lo sviluppo successivo del sistema.

Si definiscono vincoli e carichi, considerando il peso proprio e carichi supplementari nelle zone considerate percorribili.

Dall'analisi si ottiene la rappresentazione dell'andamento degli sforzi tramite una mesh e campo vettoriale: la mesh è colorata con gradiente bianco/nero, dove le zone chiare corrispondono alle aree di maggior concentrazione degli sforzi, che quindi richiedono maggior rigidità.

Il campo vettoriale fungerà da indicatore di direzione per il movimento degli agenti, mentre il colore della mesh verrà utilizzato come dato per variare distribuzione dei punti e ramificazioni.



- Supports
- Mesh Loads (2 kN/m<sup>2</sup>)



- Stress vectors

Stress pattern 0 1.47 kN/cm<sup>2</sup>

## ANALISI DELLA CURVATURA

Altri dati utili per le fasi successive sono legati alla curvatura della mesh: si effettua quindi un'analisi con un componente di Grasshopper (*Mesh Curvature*) andando ad uniformare l'output con l'analisi precedente, quindi utilizzando un gradiente bianco/nero per la rappresentazione della curvatura della mesh in valore assoluto.



curvature pattern 0.0015 2.5484

## 3.5 DISTRIBUZIONE DEI PUNTI

---

I punti attrattori lungo la mesh sono distribuiti con densità differenziata in funzione dei dati forniti dalle analisi precedenti: si utilizzano infatti le mesh colorate con gradiente per dare un raggio di distanza diverso in base alle zone.

Per questa fase viene realizzato un algoritmo iterativo che genera un rilassamento dei punti secondo le distanze impostate e l'eliminazione di quelli in eccesso. Parte del codice riprende quanto appreso nelle lezioni di Long Nguyen [08].

Ad ogni punto viene associato inoltre un vettore derivante dal campo vettoriale degli sforzi, dato dalla media dei vettori nell'intorno.

Il componente creato presenta il seguente funzionamento.

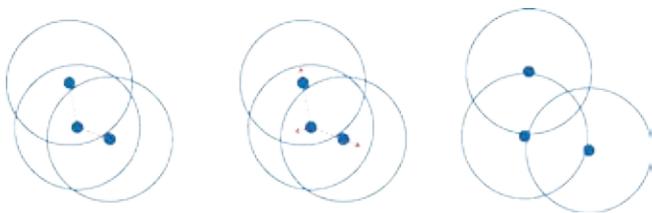
#### INPUT

- Mesh colorata con gradiente bianco-nero dato dall'analisi (strutturale o della curvatura)
- Posizionamento casuale di punti (in numero maggiore rispetto al necessario)
- Valori di distanza minima e massima tra i punti

#### PROCESSO

Ad ogni punto viene associato un raggio di distanza 'rad' (calcolato in base all'intervallo minimo e massimo di input) in funzione del valore di Brightness (0-1) della mesh nella posizione corrente.

Viene effettuata una ricerca dei punti vicini, quindi calcolato il vettore per il movimento in funzione dei punti vicini trovati, come illustrato nel diagramma.



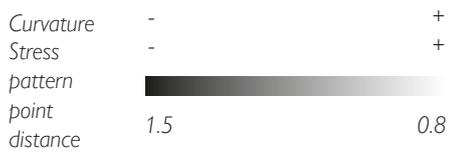
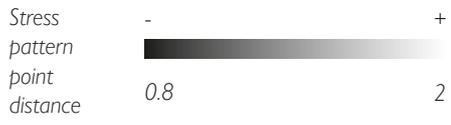
$$\text{movement} = (\text{distance} - \text{rad}) \cdot 0.5$$

Nel caso in cui un punto anche dopo diversi movimenti si trovi entro un raggio di  $0.7 \cdot \text{rad}$  dal vicino, allora questo viene eliminato.

Ogni iterazione viene ricalcolato il raggio di distanza in funzione delle diverse posizioni assunte, inoltre si associa ad ogni punto un vettore derivante dal campo vettoriale degli sforzi, dato dalla media dei vettori presenti entro il raggio di distanza  $d$ .

#### OUTPUT

Tensori (punti + vettori) distribuiti secondo i parametri impostati lungo la mesh.



Si riportano degli esempi di distribuzioni diverse, in funzione della mesh e delle distanze di input, che sono state sperimentate nel corso della ricerca.

La logica alla base della distribuzione differenziata dei punti è stata creare variabilità nel pattern di ramificazioni finali: inizialmente infatti, il gradiente di distanza era molto ampio, per rendere ben evidente la differenza tra le parti nel risultato finale (come si osserverà dai primi risultati nel capitolo successivo).

Con il perfezionamento del sistema sono state poi aggiunte altre variabili di sviluppo e il gradiente delle distanze tra punti è stato ridotto, per mantenere lunghezze più omogenee dei rami.

Per quanto riguarda le mesh utilizzate, sono state fatte diverse sperimentazioni in funzione delle diverse analisi illustrate nel capitolo precedente.

Nelle prima due mesh il colore rappresenta l'andamento degli sforzi e i punti vengono posizionati con maggior densità prima delle zone nere, poi nelle zone bianche.

Nel terzo esempio il colore rappresenta la curvatura assoluta della mesh di base e i punti hanno densità maggiore nelle zone più curve con l'ottica di avere lunghezze minori dei rami in tali aree.

La mesh dell'ultimo esempio tiene in considerazione sia le zone con massimo stress, sia con massima curvatura, mantenendo la disposizione dei punti più densa nella parte bianca.

## 3.6 SVILUPPO DEL SISTEMA SU SUPERFICIE

---

Riprendendo dalle regole illustrate a inizio capitolo, il sistema si basa sul movimento di agenti che lasciano una traccia della traiettoria percorsa e creano ramificazioni in base a punti attrattori distribuiti nell'ambiente, rappresentato da una superficie guida precedentemente modellata.

### PUNTI DI PARTENZA

La scelta dei punti di partenza viene automatizzata: come primo criterio si scelgono tra i punti attrattori quelli entro un raggio di distanza piccolo dal supporto (suolo o parete), aventi come direzione di partenza un vettore direzionato verso i punti attrattori più vicini.

Il criterio viene perfezionato limitando la scelta a punti a intervalli regolari sui bordi a contatto col supporto; la direzione di partenza è per tutti la proiezione dell'asse  $z$  sulla mesh, andando a uniformare l'andamento dei rami iniziali.

## LIMITE DI SVILUPPO

Con lo sviluppo su superficie i punti terminali perdono importanza, poiché le tracce avranno uno sviluppo limitato all'estensione della mesh.

Viene introdotto un comportamento di allineamento ai bordi estremi della mesh e l'interruzione delle tracce nel momento in cui l'agente si trova in spigoli o in punti terminali.

Vengono riportati i primi esempi di applicazione su superfici con la regola di ramificazione illustrata nei primi capitoli.

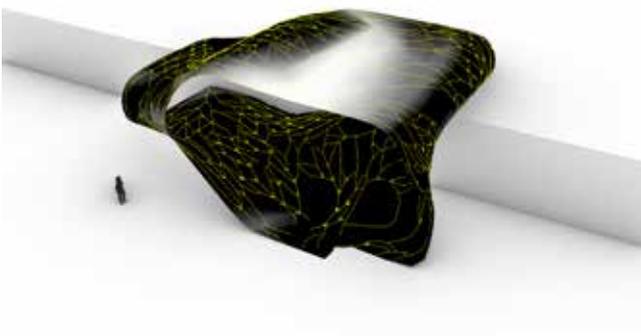
Si osserva come questa non risulti adatta poiché non porta ad uno sviluppo omogeneo e distribuito su tutta la superficie. Inoltre occorre un miglior controllo su numero e angolo di ramificazioni ai nodi: perciò di è deciso di cambiare regola di ramificazione.



### DISTRIBUZIONE PUNTI



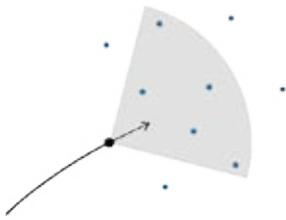
Superficie eseguita tramite Isosurface, senza fase di omogeneizzazione e Form-Finding.  
 Analisi strutturale eseguita col plug-in Millipede, basato su un metodo iterativo, meno preciso rispetto a Karamba3D.



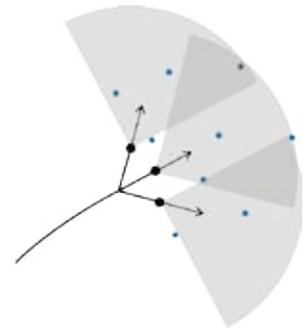
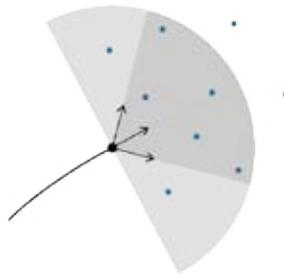
### SVILUPPO SISTEMA

branching  $f(\text{point distance})$   
 Cono visivo: raggio 4 - angolo  $90^\circ$   
 $aIS = 0$  -  $coS = 0$  -  $sepS = 0$   
 field  $aIS = 0.5$

*branch length >  $L_{min}$   
N attractors*



*discretized branching angle*



## REGOLA DI RAMIFICAZIONE

La regola di ramificazione viene modificata per poter avere una corrispondenza tra densità di distribuzione dei punti e risultato finale, rendendola dipendente dal numero di punti visti nel cono visivo e non più dalla distanza da questi.

Gli agenti possono quindi ramificare nel momento in cui visualizzano nel cono visivo almeno un numero definito (N) di elementi, corrispondente alla zona di maggior densità.

Vengono definite una lunghezza minima, che il ramo deve avere per poter generare la ramificazione, e una lunghezza massima, superata la quale sono sufficienti due punti nel cono visivo per ramificare.

L'angolo di ramificazione non è più in funzione dei punti visualizzati, ma viene limitata la ramificazione ad un massimo di tre rami, con angoli definiti.

In questo modo si avranno più ramificazioni nelle zone di maggior densità di punti e un miglior controllo sulle lunghezze dei rami.

Si riportano degli esempi in cui viene mantenuto lo stesso intervallo di dimensioni per distanza tra i punti e lunghezze dei rami, infatti la variabilità del pattern finale rispecchia esattamente la distribuzione dei punti.

Vengono utilizzati diversi angoli di ramificazione e numero massimo di rami.

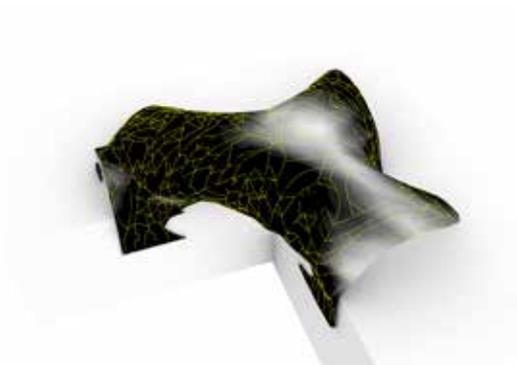
Superficie eseguita tramite Isosurface, senza fase di omogeneizzazione e Form-Finding.  
 Analisi strutturale eseguita col plug-in Millipede.



DISTRIBUZIONE PUNTI



INPUT SVILUPPO SISTEMA



**branching f(n points)**

$n = 5$

$L_{min} = 1$

$L_{max} = 3$

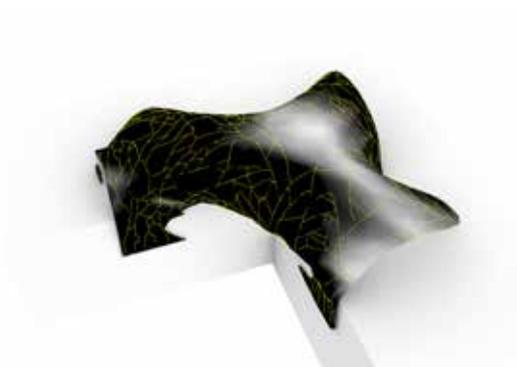
**branching angle =  $45^\circ$**

**n max rami = 3**

Cono visivo: raggio 3 - angolo  $90^\circ$

$alS = 0$  -  $coS = 0$  -  $sepS = 0.5$

field  $alS = 0.5$



**branching f(n points)**

$n = 5$

$L_{min} = 1$

$L_{max} = 3$

**branching angle =  $45^\circ$**

**n max rami = 2**

Cono visivo: raggio 3 - angolo  $90^\circ$

$alS = 0$  -  $coS = 0$  -  $sepS = 0.5$

field  $alS = 0.5$



**branching f(n points)**

$n = 5$

$L_{min} = 1$

$L_{max} = 3$

**branching angle =  $30^\circ$**

**n max rami = 2**

Cono visivo: raggio 3 - angolo  $90^\circ$

$alS = 0$  -  $coS = 0$  -  $sepS = 0.5$

field  $alS = 0.5$

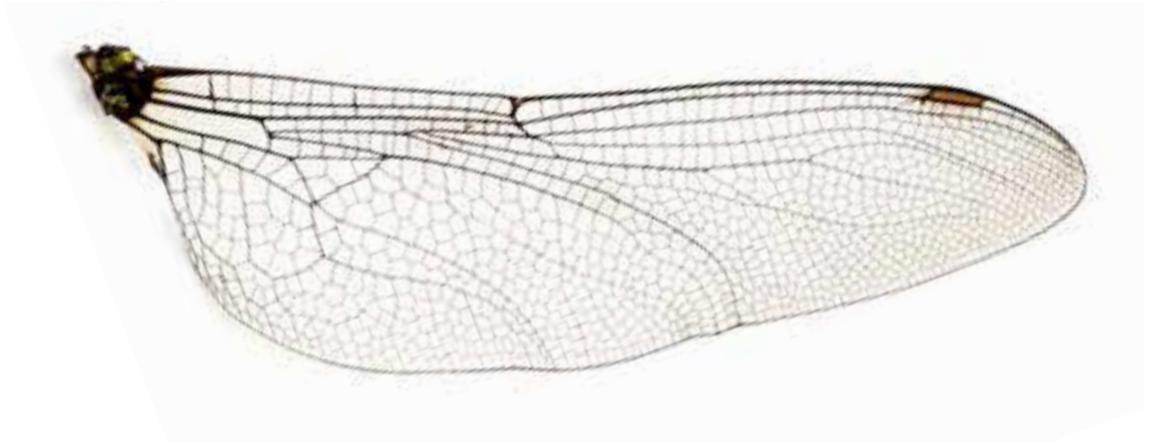


fig. 3.1\_ Ala di libellula

## ANGOLO DI RAMIFICAZIONE

Oltre alla differenziazione della lunghezza dei rami viene valutata anche la variazione dell'angolo di ramificazione in funzione della posizione sulla mesh, aumentandolo fino a  $90^\circ$  nelle zone che richiedono maggior rigidezza.

Questo comportamento simula i pattern creati dalle venature di organismi naturali, dove le parti che fungono da sostegno presentano angoli tendenzialmente retti.

Vengono fatti diversi test per valutare gli effetti di questa variazione con diverse lunghezze e distribuzioni di punti su una superficie semplice.

### DISTRIBUZIONE OMOGENEA

$$- L_{\min} = L_{\max}$$

- Si osserva l'effetto della variazione di questa lunghezza sul pattern finale

- Gradienti diversi di angolo di ramificazione

Si preferisce un gradiente di angolo di ramificazione meno ampio, quindi con angoli da  $45^\circ$  a  $90^\circ$ , L'utilizzo di angoli maggiori ai nodi crea un risultato più pulito.

In entrambi i test si osserva come l'aumento della

lunghezza dei rami porta ad un risultato meno ordinato, mascherando la variazione voluta con gli angoli di ramificazione, questo anche dovuto alla minor estensione della zona bianca.

#### DISTRIBUZIONE DIFFERENZIATA I - II

- I punti possono essere infittiti nella parte nera della mesh o bianca, in funzione di soli sforzi
- $L_{\min} < L_{\max}$  (indipendenti dalla distanza tra i punti)
- Si osserva l'effetto della variazione di queste lunghezze sul pattern finale

Come per i risultati precedenti l'aumento delle lunghezze, porta ad una riduzione delle variazioni del pattern.

Per apprezzare meglio il cambio di angolo di ramificazione si predilige una maggior densità dei punti nelle zone bianche, per aumentare il numero di celle con angoli tendenzialmente retti.

#### DISTRIBUZIONE DIFFERENZIATA III

Si valuta di far dipendere lo sviluppo del sistema anche dalla curvatura della mesh, utilizzando superfici più complesse per avere una variazione migliore.

- Punti con densità maggiore nelle zone bianche per avere più ramificazioni anche nelle zone a maggior curvatura (elementi più corti per una miglior discretizzazione)

- Mantenendo il criterio di angoli a  $90^\circ$  nelle zone che richiedono maggior rigidezza, si effettuano delle prove utilizzando per la gestione delle ramificazioni una mesh in cui le zone bianche rappresentano le zone a minor curvatura (e maggior sforzo), per compensare la minor rigidezza per forma con un pattern potenzialmente più rigido. Si valutano le potenzialità con un'analisi strutturale nel capitolo 2.8.

DISTRIBUZIONE OMOGENEA

Stress pattern  
point distance

- 1 1 +



branching  $f(n \text{ points})$   
 $n = 3$

Cono visivo: raggio 2 - angolo  $90^\circ$   
 $aS = 0$  -  $coS = 0$  -  $sepS = 0$   
field  $aS = 0.5$



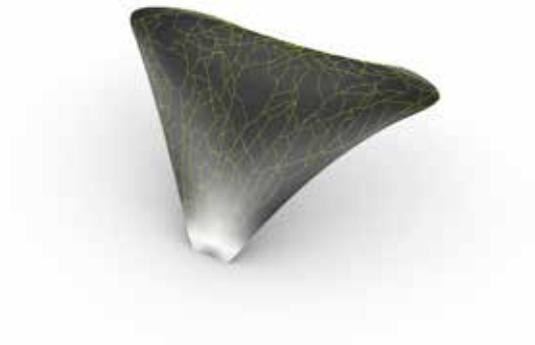
Stress pattern  
Branching angle

- 30° 90° +



N max branches 2 ( $bri < 0.3$ ) 3

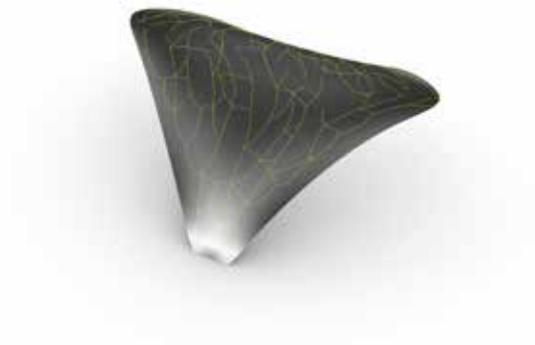
branching length  
 $L_{min} = L_{max} = 1$



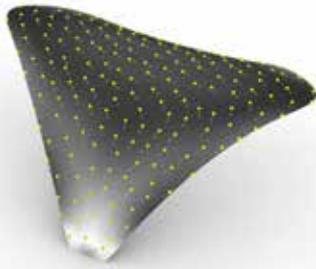
branching length  
 $L_{min} = L_{max} = 1.5$



branching length  
 $L_{min} = L_{max} = 2$



DISTRIBUZIONE OMOGENEA

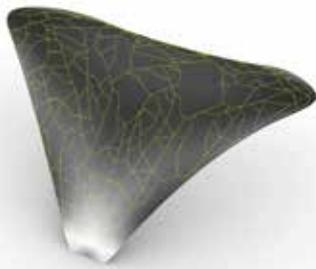


Stress pattern  
point distance

- 1 1 +

branching  $f(n \text{ points})$   
 $n = 3$

Cono visivo: raggio 2 - angolo  $90^\circ$   
 $alS = 0 - coS = 0 - sepS = 0$   
field  $alS = 0.5$

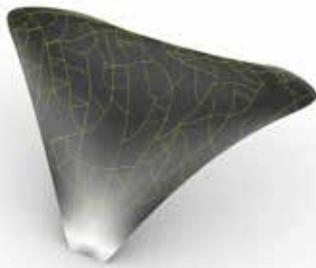


Stress pattern  
Branching angle  
 $N \text{ max branches}$

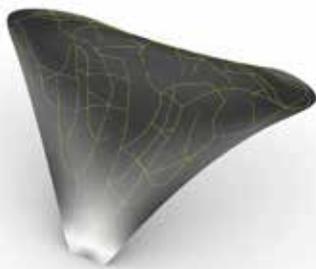
- 45° 90° +

2 (bri < 0.3) 3

branching length  
 $L_{min} = L_{max} = 1$



branching length  
 $L_{min} = L_{max} = 1.5$



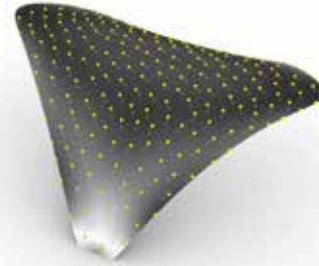
branching length  
 $L_{min} = L_{max} = 2$

DISTRIBUZIONE DIFFERENZIATA I

Stress pattern  - +  
 point distance 0.8 1.5

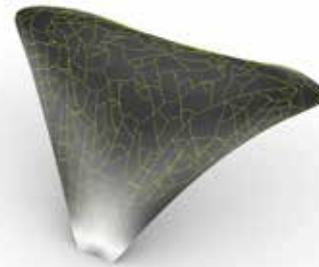
branching  $f(n \text{ points})$   
 $n = 3$

Cono visivo: raggio 2 - angolo  $90^\circ$   
 $alS = 0$  -  $coS = 0$  -  $sepS = 0$   
 $field \text{ alS} = 0.5$

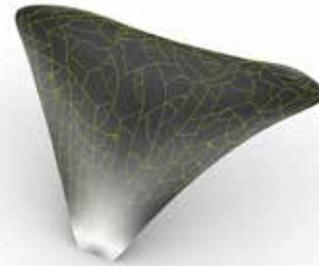


Stress pattern  - +  
 Branching angle  $30^\circ \longrightarrow 90^\circ$   
 N max branches 2 ( $bri < 0.3$ ) 3

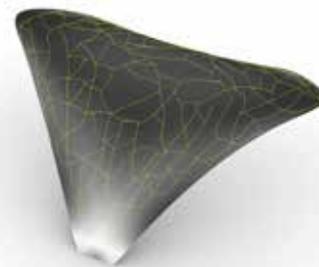
branching length  $L_{min} = 0.8$   
 $L_{max} = 1.5$



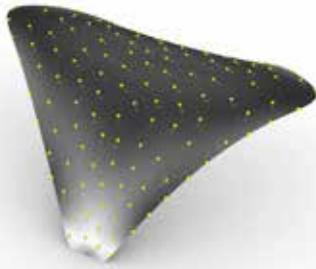
branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 2$



branching length  $L_{min} = 1.5$   
 $L_{max} = 2.5$



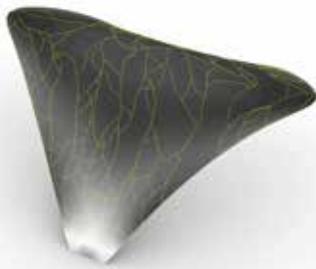
DISTRIBUZIONE DIFFERENZIATA II



Stress pattern - +  
 point distance 1.5 0.8

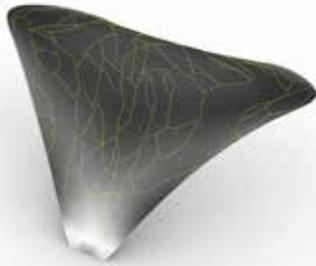
branching  $f(n \text{ points})$   
 $n = 3$

Cono visivo: raggio 2 - angolo  $90^\circ$   
 $aIS = 0 - coS = 0 - sepS = 0$   
 field  $aIS = 0.5$

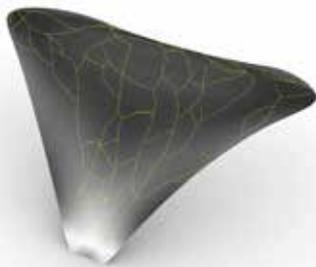


Stress pattern - +  
 Branching angle  $45^\circ \longrightarrow 90^\circ$   
 N max branches 2 ( $bri < 0.3$ ) 3

branching length  $L_{min} = 0.8$   
 $L_{max} = 1.5$



branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 2$



branching length  $L_{min} = 1.5$   
 $L_{max} = 2.5$

DISTRIBUZIONE DIFFERENZIATA III

Curvature - +  
 Stress - +  
 pattern   
 point distance 0.8 1.5

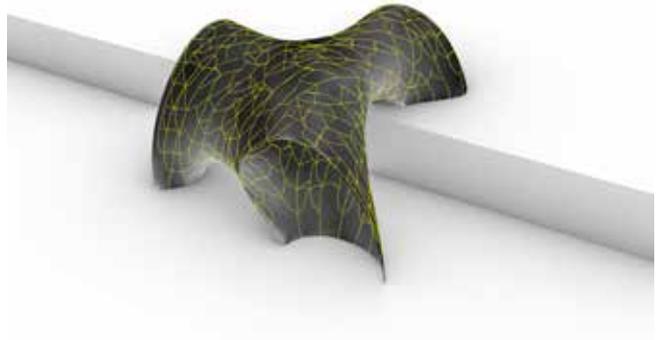
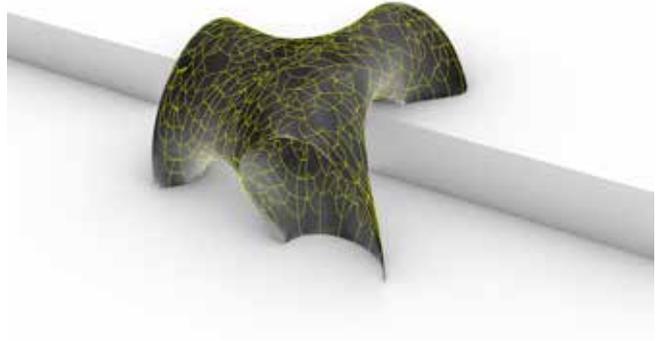
branching  $f(n \text{ points})$   
 $n = 7$

Cono visivo: raggio 3 - angolo  $90^\circ$   
 $alS = 0 - coS = 0 - sepS = 2$   
 field  $alS = 2$

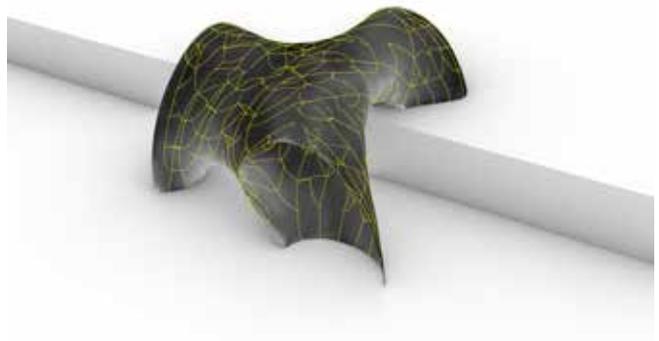


Curvature - +  
 Stress - +  
 pattern   
 Branching angle  $45^\circ \longrightarrow 90^\circ$

branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 1.5$



branching length  $L_{min} = 1.5$   
 $L_{max} = 2$



branching length  $L_{min} = 2$   
 $L_{max} = 2.5$

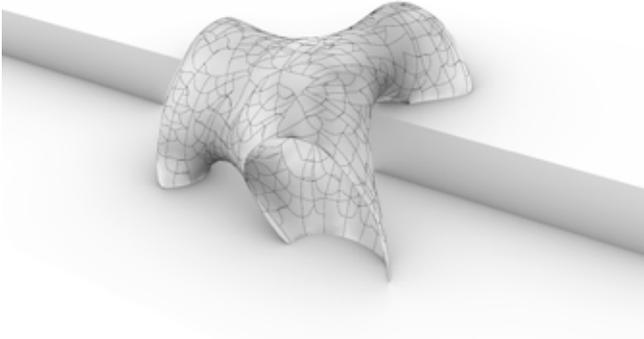
DISTRIBUZIONE DIFFERENZIATA III



Curvature - +  
 Stress - +  
 pattern   
 point 0.8 1.5  
 distance

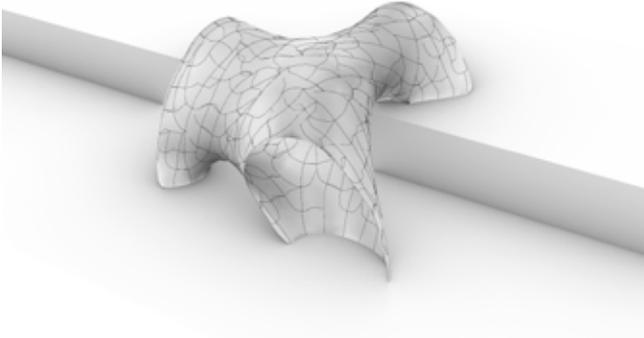
branching  $f(n \text{ points})$   
 $n = 7$

Cono visivo: raggio 3 - angolo  $90^\circ$   
 $aIS = 0 - coS = 0 - sepS = 2$   
 field  $aIS = 2$

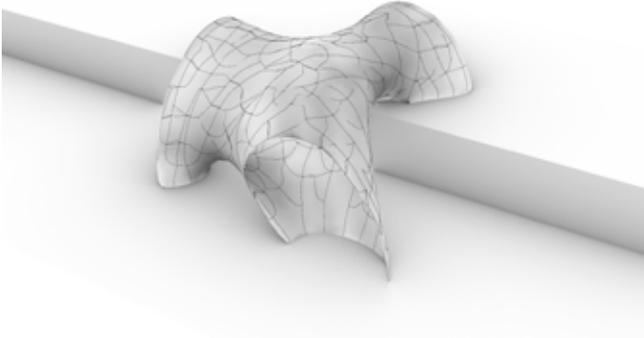


Curvature + -  
 Stress - +  
 pattern   
 Branching angle  $45^\circ \longrightarrow 90^\circ$

branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 1.5$



branching length  $L_{min} = 1.5$   
 $L_{max} = 2$



branching length  $L_{min} = 2$   
 $L_{max} = 2.5$

## 3.7 POST PRODUZIONE

---

La fase di post-produzione spiegata precedentemente (p. 42) viene adattata e perfezionata per una pulizia del pattern, successiva allo sviluppo delle ramificazioni sulla superficie, con l'ottica di rendere le tracce e i nodi più facilmente traducibili in geometrie costruibili.

Viene creato un apposito componente per rendere automatico il processo secondo tolleranze e parametri stabiliti.

Dal componente precedente di crescita delle ramificazioni vengono trasmessi i dati relativi a polilinee e nodi (memorizzati come piani localmente tangenti alla mesh) e all'interno del componente viene ricostruito il grafo topologico basato su indici di nodi e connessioni, utilizzato per ricondursi facilmente alla connettività tra nodi e tracce.

Il componente viene implementato con un algoritmo per il riconoscimento delle celle chiuse della struttura, utile per la modellazione successiva.

## PULIZIA

### TRACCE DOPPIE

Se presenti tracce doppie, intese come polilinee che iniziano e finiscono negli stessi nodi, viene eliminata quella con lunghezza maggiore.



### TRACCE NON CONNESSE

La connessione delle tracce interrotte è limitata a punti distanti dai nodi o ai nodi stessi, solo se già aventi meno di cinque rami confluenti, perciò è possibile che non tutte le tracce interrotte riescano a trovare un punto di ancoraggio. Verranno quindi rimosse in questa fase.



### INTERSEZIONI

Con l'interruzione e interconnessione delle tracce può succedere che si creino intersezioni: una volta riconosciute viene eliminata la traccia con lunghezza minore.



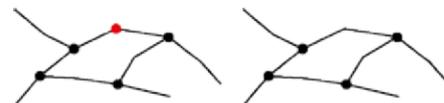
### ANGOLI TROPPO PICCOLI

Un'ulteriore pulizia riguarda la rimozione di tracce che creano angoli troppo stretti ai nodi. Per ogni nodo, conoscendo l'ordine delle tracce connesse, vengono calcolati gli angoli relativi e in caso di valori inferiori di una determinata soglia ( $25^\circ$ ), viene eliminata la traccia con lunghezza maggiore.



### NODI SUPERFLUI

Vengono considerati nodi superflui quelli aventi solo due rami confluenti: questi verranno quindi eliminati, unendo le due tracce in una unica.



### COLLISIONE NODI

Nel caso in cui due nodi siano collegati da una traccia di dimensioni troppo piccole, questi vengono fatti confluire in uno unico, con posizione media.

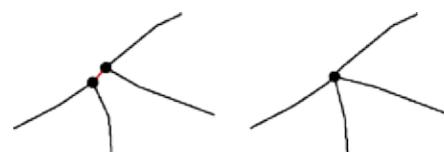




fig. 3.1\_ Output dal componente di sviluppo del sistema: tracce.



fig. 3.2\_ Tracce raccordate



fig. 3.3\_ Tracce raddrizzate

## MODIFICA DELLE TRACCE

Il pattern viene riorganizzato modificando le tracce e mantenendo fissi i nodi, in modo da eliminare curvature concentrate e ridefinire la risoluzione.

La risoluzione delle tracce uscenti dal sistema corrisponde all'ampiezza del vettore velocità degli agenti; in questa fase viene ridefinita questa distanza secondo un valore stabilito ( $r \sim 0.15$  cm), eliminando punti in caso di segmenti troppo corti ( $\text{dist} < 0.75 r$ ) e aggiungendone se troppo lunghi ( $\text{dist} > 1.5 r$ ).

Sono previste due tipologie di output: il primo, derivante da quanto fatto per la distribuzione spaziale, con tracce raccordate e il secondo, con il massimo raddrizzamento possibile delle tracce, mantenendole adese alla mesh. La scelta dell'output dipende dal tipo di sistema costruttivo utilizzato.

### OUTPUT I - TRACCE RACCORDATE

Per ogni nodo viene fissata la direzione, data dal vettore velocità assunto dall'agente al momento della ramificazione. Nel caso in cui le tracce afferenti al nodo abbiano un angolo minore di  $70^\circ$ , i punti alle estremità tenderanno a portarsi verso l'asse di direzione, con intensità calante con l'aumentare della distanza dal nodo. Nel caso invece in cui la traccia sia ortogonale (tolleranza  $20^\circ$  circa) allora la direzione del nodo viene ignorata.

### OUTPUT II - TRACCE 'DRITTE'

Se la direzione al nodo non viene considerata, ogni traccia tenderà solamente a raddrizzarsi, creando il percorso minimo tra un nodo e l'altro, mantenendo l'adesione alla mesh. In questo modo si riducono il più possibile le curvature delle tracce, rendendole traducibili in geometrie più semplici.

## CELLE CHIUSE

Per l'estrapolazione delle celle poligonali chiuse della struttura finale è stato utilizzato un algoritmo di una libreria open-source (Ryan Schmidt, Gradientspace, Geometry3) [09], adattato al sistema corrente.

Per poter trovare le celle chiuse è necessario che il grafo non si auto-intersechi e che le connessioni afferenti ad ogni nodo possano essere ordinate in base all'angolo.

Per ogni nodo viene quindi usato come riferimento l'asse x del piano tangente alla mesh (asse z = asse normale alla mesh), rispetto alla quale vengono calcolati gli angoli creati con le direzioni (uscenti dal nodo) delle tracce, quindi ordinate. In questo modo per ogni nodo è possibile conoscere le coppie di tracce consecutive, tramite la memorizzazione di coppie di indici (fig. 3.4).

L'algoritmo quindi, conoscendo le liste di nodi e di coppie di tracce consecutive (attraverso gli indici), percorre nodo per nodo le coppie di tracce, finché non viene chiuso il circuito con l'arrivo allo stesso nodo di partenza. Man mano che le coppie di tracce consecutive vengono attraversate vengono eliminate dalla lista per non creare celle intersecanti.

Si riportano due immagini esplicative in cui le polilinee chiuse delle celle sono colorate diversamente in base all'ordine di creazione.

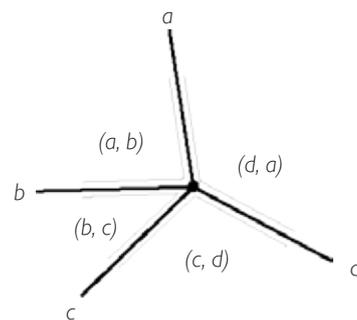
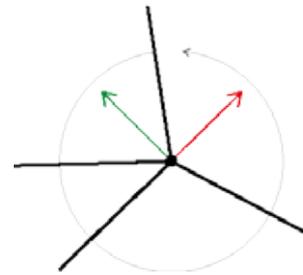


fig. 3.4\_ Assi di riferimento per l'ordine delle ramificazioni. Rappresentazione delle coppie di tracce consecutive



## 3.8 VALUTAZIONE DEI RISULTATI

---

I risultati dello sviluppo del sistema si osservano su diverse superfici, con diversi input (posizionamento punti, mesh, lunghezze rami), osservando la distribuzione della curvatura delle tracce e l'analisi delle deformazioni.

Per la classificazione della curvatura delle tracce si utilizza GluLamb (Tom Svilans, PhD project *Integrated material practice in free-form timber structures as part of the InnoChain network, based at CITA and supported by industrial partners White arkitekter AB and Blumer Lehmann AG*) [10], mentre per l'analisi delle deformazioni si utilizza Karamba3D, con le stesse condizioni di carico utilizzate per la prima analisi della superficie.

Oltre alla analisi citate sopra, si riporta lo schema delle tracce colorate in base alle lunghezze. Non avendo utilizzato un gradiente ampio di lunghezze minima e massima per la ramificazione, si osserva

una distribuzione varia delle lunghezze delle tracce, senza grosse distinzioni in base alla densità dei punti.

In generale si osserva che l'aumento delle lunghezze dei rami porta ad un peggioramento delle prestazioni a livello strutturale, dando luogo a maggiori deformazioni.

Per quanto riguarda la differenziazione della mesh di input per la gestione delle ramificazioni e della distribuzione dei punti, non si distinguono particolari cambiamenti, se non un leggero calo delle deformazioni nel primo esempio con l'utilizzo della mesh che considera tra le aree più chiare le zone a minor curvatura, dove il maggiore utilizzo di angoli retti per le ramificazioni porta ad una miglior connettività dei rami.

Le strutture studiate presentano caratteristiche molto diverse tra loro: si osserva come, per le superfici con doppie curvature distribuite, già più rigide per forma, la tipologia di mesh di input non cambia in modo evidente il risultato, consentendo in tutti i casi l'uso di elementi strutturali con minori dimensioni e con meno deformazioni.

La maggior parte delle tracce risulta planare, consentendo l'uso per lo più di elementi a singola curvatura. Con l'aumento delle lunghezze si ha naturalmente un calo del numero di pezzi, ma un aumento percentuale dei pezzi a singola e doppia curvatura.

*Parametri di comportamento utilizzati nelle prove seguenti:*

*branching f(n points)  
n = 7*

*Cono visivo: raggio 3 - angolo 90°*

*aIS = 0 - coS = 0 - sepS = 2*

*field aIS = 2*

PUNTI: distribuzione differenziata II  
 min dist = 0.8  
 max dist = 1.5

Stress pattern -  +  
 Branching angle 45°  90°  
 Branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 1.5$



PUNTI: distribuzione differenziata III  
 min dist = 0.8  
 max dist = 1.5

Curvature - +  
 Stress pattern - +  
  
 Branching angle 45°  90°  
 Branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 1.5$



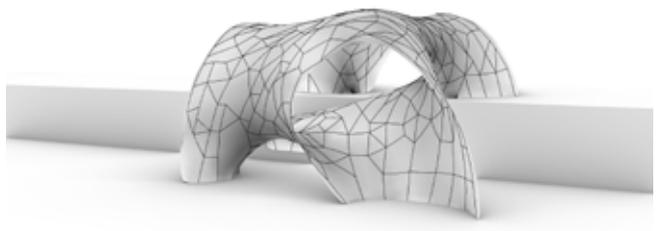
PUNTI: distribuzione differenziata III  
 min dist = 0.8  
 max dist = 1.5

Curvature + -  
 Stress pattern - +  
  
 Branching angle 45°  90°  
 Branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 1.5$



PUNTI: distribuzione differenziata III  
 min dist = 0.8  
 max dist = 1.5

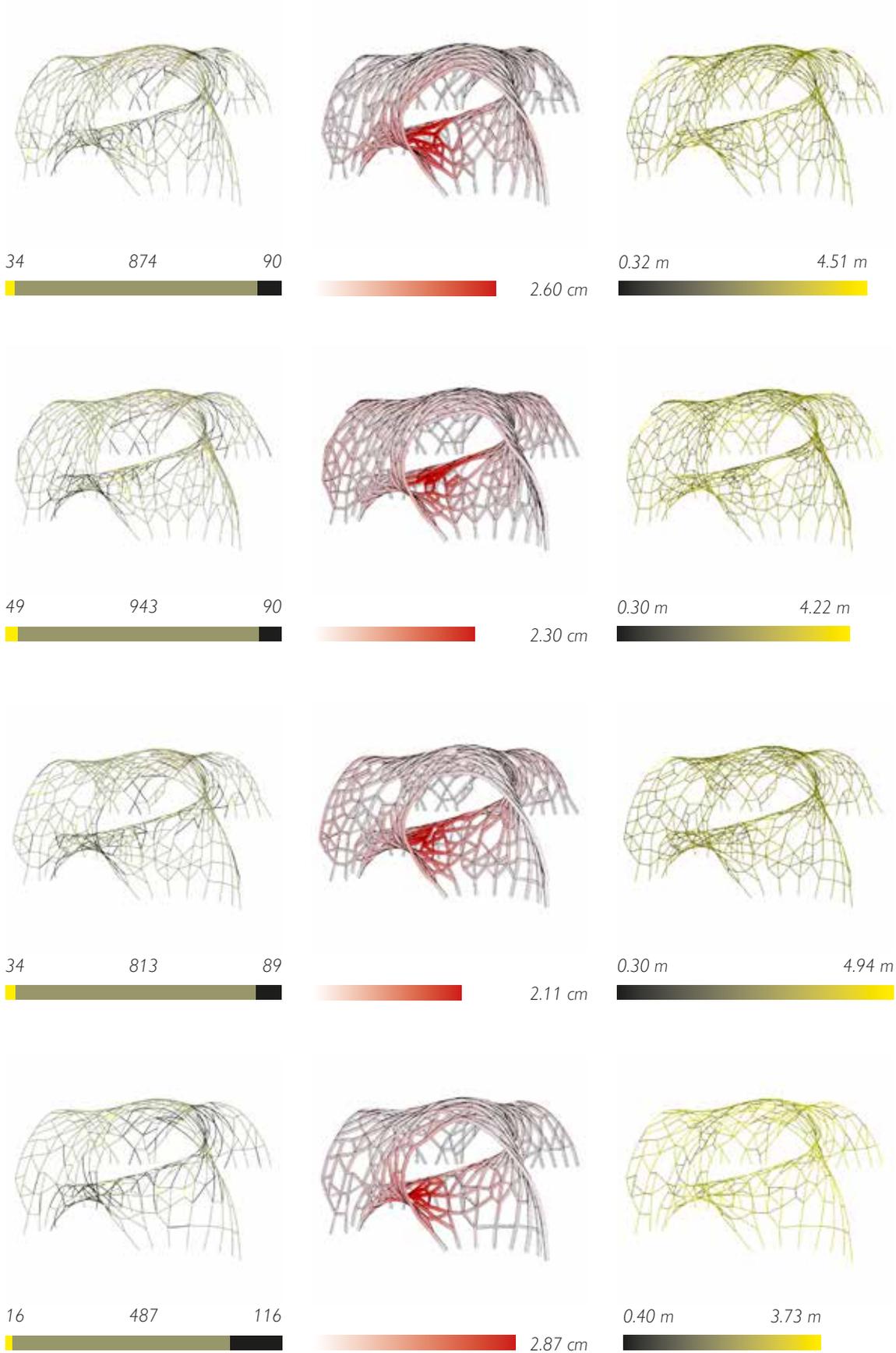
Curvature + -  
 Stress pattern - +  
  
 Branching angle 45°  90°  
 Branching length  $L_{min} = 1.5$   
 $L_{max} = 2$



CURVATURA  
 ● straight ● single curved ● double curved

DEFORMAZIONE  
 Sezione 20x28 cm

LUNGHEZZA



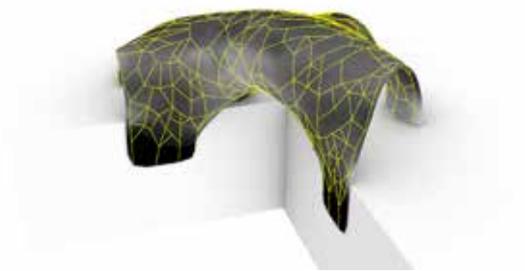
PUNTI: distribuzione differenziata II  
 min dist = 0.8  
 max dist = 1.5

Stress pattern - +  
 Braching angle 45° → 90°  
 Branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 1.5$



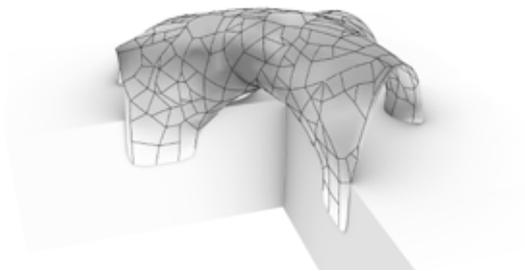
PUNTI: distribuzione differenziata III  
 min dist = 0.8  
 max dist = 1.5

Curvature - +  
 Stress pattern - +  
 Braching angle 45° → 90°  
 Branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 1.5$



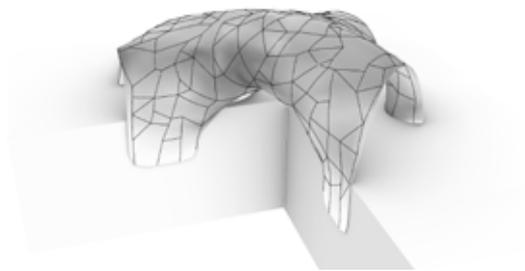
PUNTI: distribuzione differenziata III  
 min dist = 0.8  
 max dist = 1.5

Curvature + -  
 Stress pattern - +  
 Braching angle 45° → 90°  
 Branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 1.5$



PUNTI: distribuzione differenziata III  
 min dist = 0.8  
 max dist = 1.5

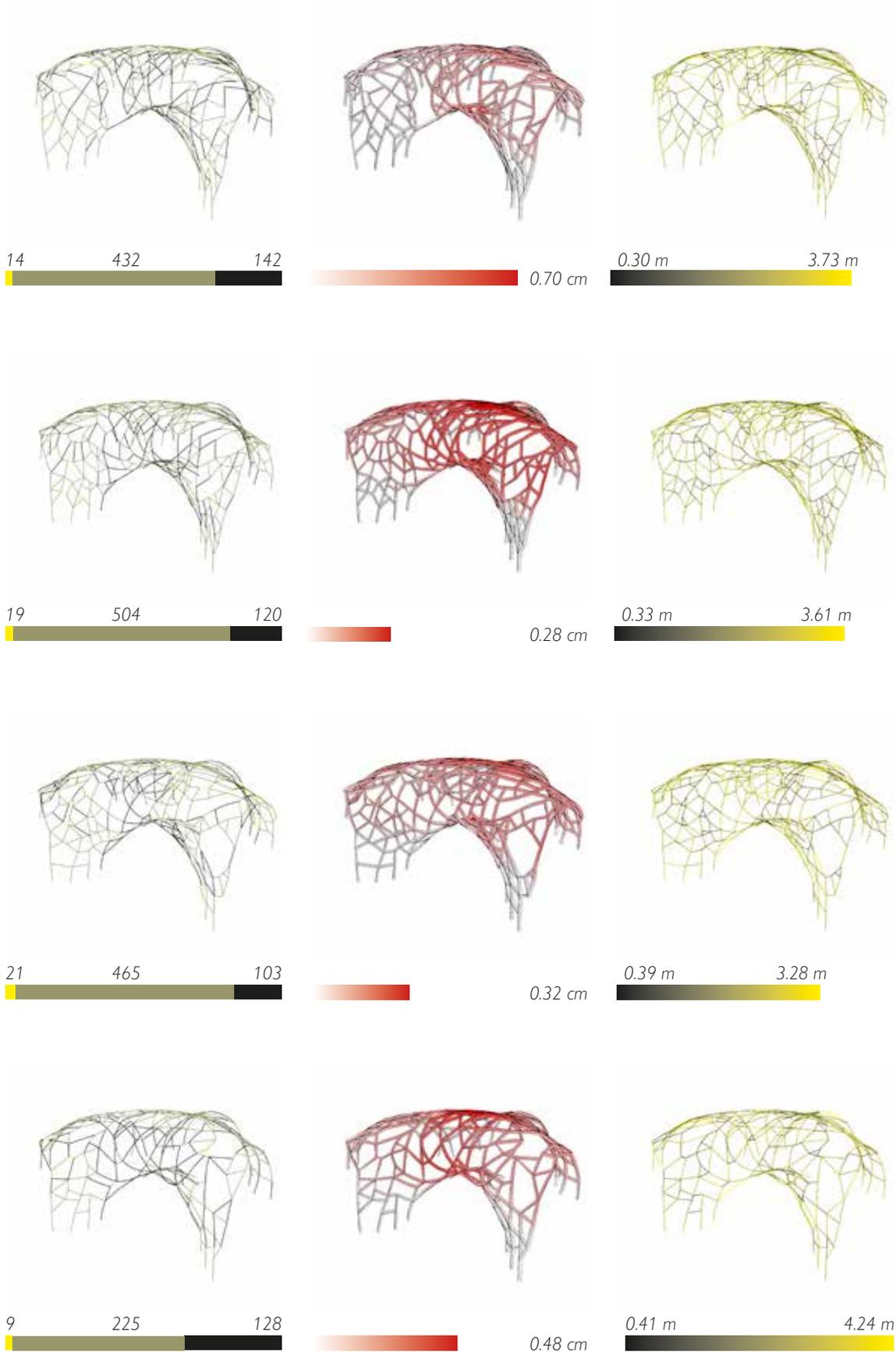
Curvature + -  
 Stress pattern - +  
 Braching angle 45° → 90°  
 Branching length  $L_{min} = 1.5$   
 $L_{max} = 2$



CURVATURA  
 ● straight ● single curved ● double curved

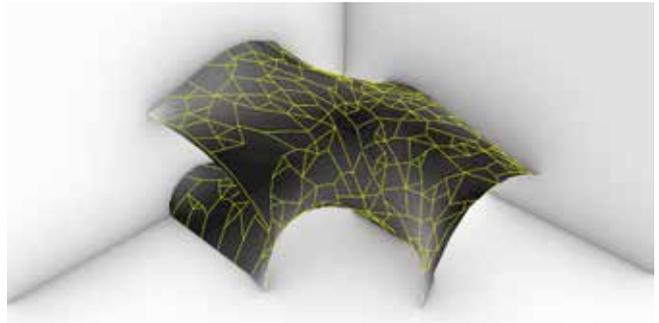
DEFORMAZIONE  
 Sezione 16x24 cm

LUNGHEZZA



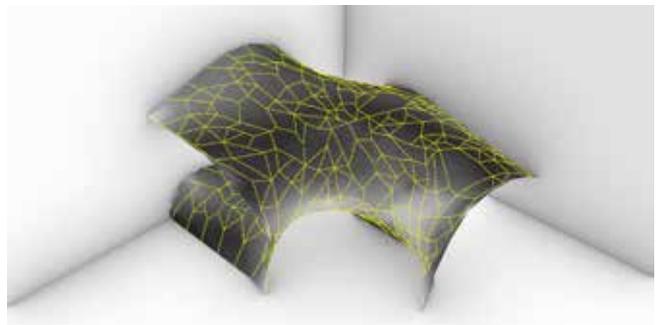
PUNTI: distribuzione differenziata II  
 min dist = 0.8  
 max dist = 1.5

Stress pattern - +  
  
 Branching angle 45°  $\longrightarrow$  90°  
 Branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 1.5$



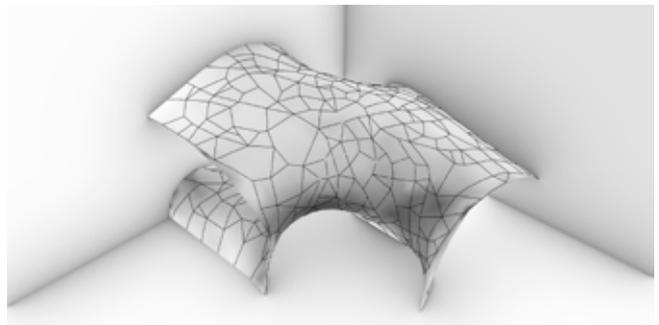
PUNTI: distribuzione differenziata III  
 min dist = 0.8  
 max dist = 1.5

Curvature - +  
 Stress pattern - +  
  
 Branching angle 45°  $\longrightarrow$  90°  
 Branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 1.5$



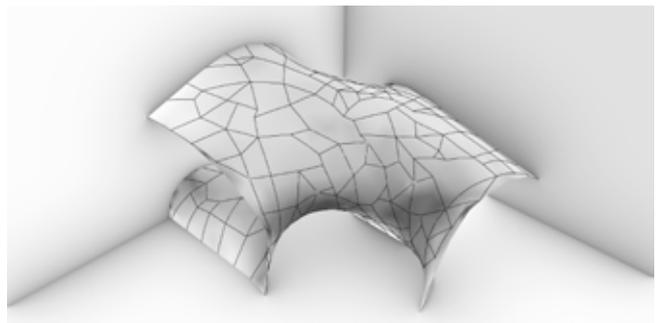
PUNTI: distribuzione differenziata III  
 min dist = 0.8  
 max dist = 1.5

Curvature + -  
 Stress pattern - +  
  
 Branching angle 45°  $\longrightarrow$  90°  
 Branching length  $L_{min} = 1$   
 $L_{max} = 1.5$



PUNTI: distribuzione differenziata III  
 min dist = 0.8  
 max dist = 1.5

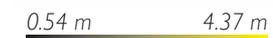
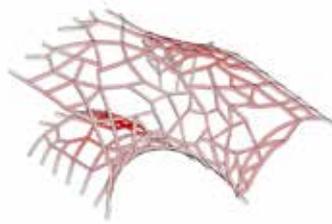
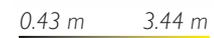
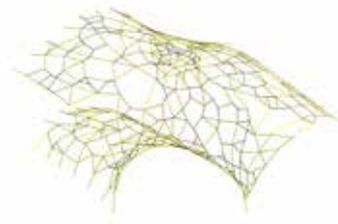
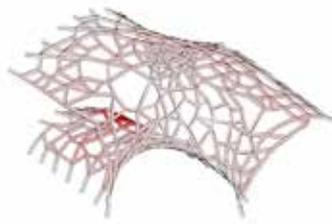
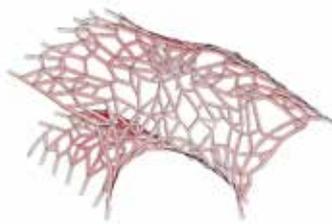
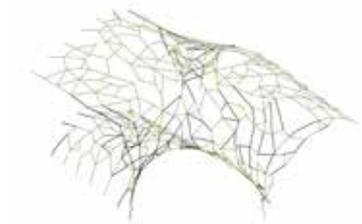
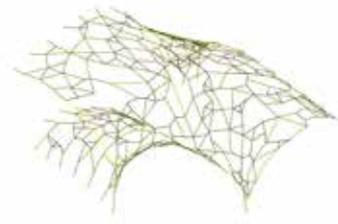
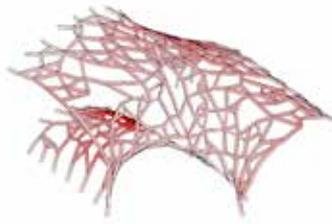
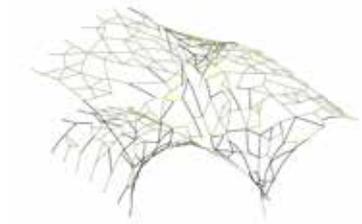
Curvature + -  
 Stress pattern - +  
  
 Branching angle 45°  $\longrightarrow$  90°  
 Branching length  $L_{min} = 1.5$   
 $L_{max} = 2$

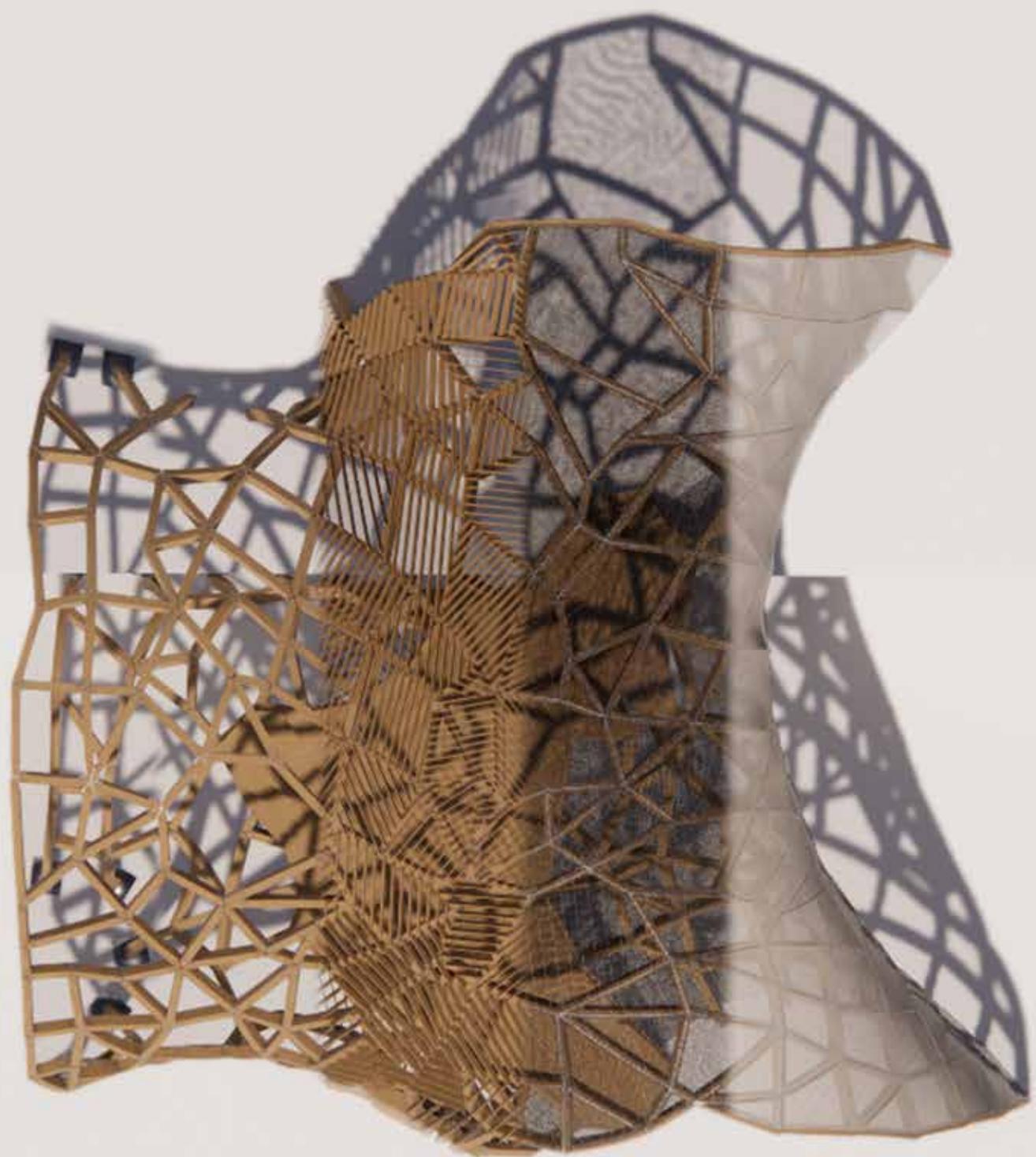


CURVATURA  
● straight ● single curved ● double curved

DEFORMAZIONE  
Sezione 20x24 cm

LUNGHEZZA

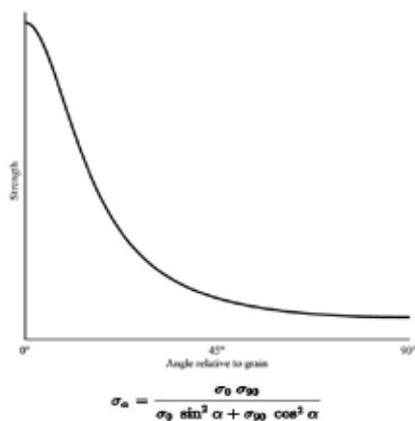




# **4 TECNOLOGIA COSTRUTTIVA**

## 4.1 LEGNO

fig. 4.1\_ L'equazione di Hankinson (1921) descrive la relazione tra l'orientamento delle fibre del legno e la resistenza a compressione del legno. L'andamento della resistenza a compressione in funzione dell'angolo è analogo.



Il sistema costruttivo proposto è costituito da elementi in legno, come traduzione delle tracce del sistema digitale, collegate ai nodi con elementi metallici.

Il legno è un materiale composito costituito da fibre di cellulosa lunghe e strette, trattenute da una matrice di lignina, che costituiscono i principali meccanismi strutturali e di trasporto di un albero. Le fibre sono disposte parallelamente alla direzione di crescita dell'albero o del ramo e crescono contemporaneamente in senso radiale verso l'esterno. Lo spessore delle pareti cellulari e la densità cellulare in un dato punto di un campione forniscono dati relativi alla forza meccanica, e variano in base alle diverse specie [07].

Essendo un materiale composito con un tipo cellulare cavo e allungato, il legno possiede caratteristiche che hanno un grande impatto sui suoi com-



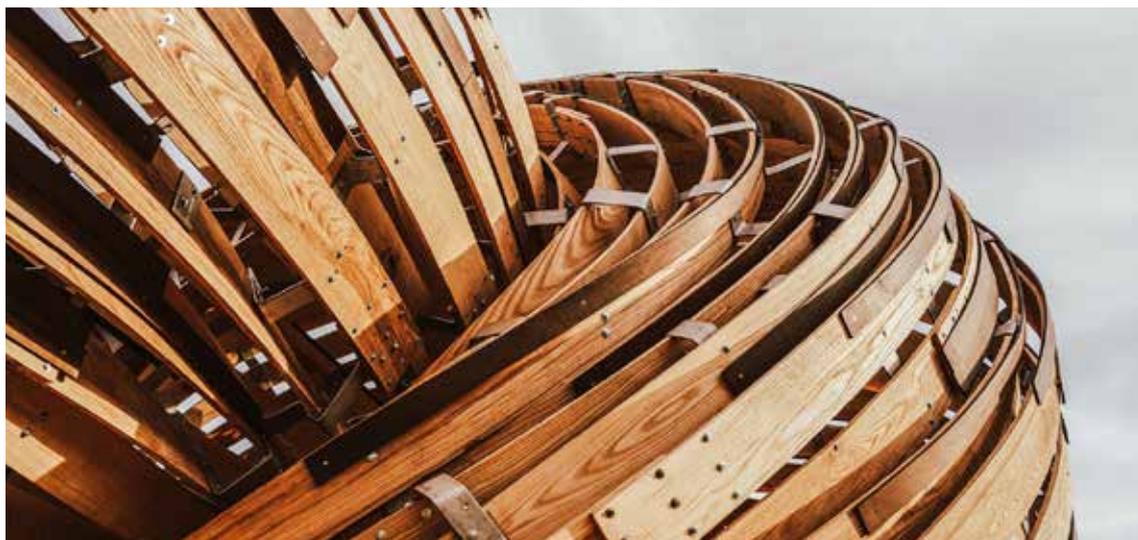
*fig. 4.2\_ Studio Gang Architects, Lincoln Park Zoo, South Pond, Chicago*

portamenti. In particolare la sua anisotropia, elasticità viscosa e igroscopicità danno origine alla maggior parte delle proprietà e dei comportamenti che influenzano sul suo utilizzo nella costruzione.

Come si osserva dal grafico relativo all'equazione di Hankinson, la resistenza del legno dipende fortemente della direzione delle fibre: si ha maggior resistenza in direzione parallela alle fibre (asse longitudinale del tronco) rispetto alle altre direzioni (radiale o tangenziale). Per la realizzazione di legno da costruzione infatti, vanno rispettati limiti per l'angolo di taglio delle fibre ( $< 5^\circ$ ) per poter avere una garanzia di piena resistenza (Svilans, 2020).

Per non avere limiti legati alle dimensioni dell'albero e ridurre i difetti del legno massiccio, gli elementi strutturali vengono spesso realizzati con legno lamellare, ovvero incollando tra loro tavole di legno classificate in base alle caratteristiche tecniche. Le lamine possono avere diversi spessori (generalmente 2-4 cm) e vengono realizzate tagliando il legno secondo la direzione delle venature, per mantenere la massima resistenza.

L'uso del legno lamellare consente inoltre di realizzare elementi curvi.



*fig. 4.3\_ Steampunk Pavilion, Gwyllim Jahn & Cameron Newnham + Soomeen Hahm Design + Igor Pantic. Tallin 2019*

## TECNICHE DI PIEGATURA

### PIEGATURA A VAPORE

L'applicazione di calore e umidità crea un rilassamento della matrice di lignina che lega le fibre di cellulosa, consentendo alle fibre di muoversi reciprocamente, assumendo nuove forme. Col raffreddamento la lignina solidifica nuovamente e il legno mantiene gran parte della deformazione assunta.

Per questa tecnica vengono utilizzate le cosiddette 'camere a vapore' in cui vengono inseriti i pezzi di legno per un tempo dipendente dallo spessore (circa 1 ora a pollice di spessore), ad una temperatura di circa 100°C. Una volta terminata questa prima fase, si procede con la piegatura del legno con l'aiuto di stampi e morsetti, fino alla completa asciugatura [11].

Con questa tecnica è possibile creare elevate curvature anche con pezzi di legno spessi, a svantaggio però della resistenza delle capacità meccaniche del legno, che subiscono un calo a causa dell'esposizione al vapore.

Nella proposta progettuale l'utilizzo di questa tecnica avrebbe permesso la creazione di elevate curvature in corrispondenza dei nodi per un raccor-



do continuo degli elementi lignei, ma si è preferito escludere tale opzione per non rischiare fragilità concentrate.

#### PIEGATURA A INTAGLIO

Quest'altra tecnica è utilizzabile con legno di spessori sottili e prevede la realizzazione di incisioni nelle parti da piegare per facilitare la piegatura locale. Il legno però non è in grado di mantenere la forma autonomamente, ma avrà bisogno di irrigidimenti per aumentare l'inerzia nel piano di piegatura, oppure di tiranti per mantenere la forma.

I pattern di intaglio possono essere diversi: a tratti paralleli in tutto lo spessore oppure incisioni più spesse in parte dello spessore.

La tecnica in questione richiede spessori molto sottili del legno e non è compatibile con la realizzazione di strutture percorribili di grandi dimensioni. Sarebbe potuta diventare un'alternativa per la progettazione di strutture temporanee autoportanti, con accortezze particolari nella modellazione della superficie guida riguardo alla curvatura per creare strutture già rigide per forma, consentendo spessori

fig. 4.4\_ Dettaglio del nodo realizzato con piegatura a intaglio.

*Digital Wood, Design & fabrication of a full-scale exhibition structure in plywood, O. Gillkvist, V. Henriksson, E. Poulsen - Chalmers University of Technology – Department of Architecture*

fig. 4.5\_ Kerf-Based Complex Wood Systems, Performative Wood Studio (Achim Menges), B. Crane, A. McGee, M. Prado, Y. Zhao, Harvard University Graduate School of Design, 2010



fig. 4.6\_ Cambridge Mosque, Marks Barfield Architects, Cambridge, 2017

più sottili della struttura.

Tale tecnica, come la precedente, avrebbe avuto bisogno di essere testata con la realizzazione di prototipi fisici per verificarne l'efficacia, ma considerate le limitazioni legate all'emergenza pandemica non è stato possibile.

#### PIEGATURA ATTIVA

Questa tecnica è consentita dall'uso del legno lamellare, poiché gli elementi vengono formati secondo la piegatura desiderata in fase di incollaggio delle lamelle, in modo tale che la colla, fissando le lamelle secondo la piegatura, aiuti al mantenimento della forma.

La curvatura viene quindi realizzata imprimendo forze attive sul legno, tuttavia ciò pone dei limiti di raggio minimo di curvatura consentito, in funzione dello spessore delle lamelle ( $s/R = 1/200$ ): più sottili saranno le lamelle, maggiore sarà il costo di realizzazione degli elementi, perciò questa tecnica è preferibilmente applicabile a pezzi di maggiori dimensioni, senza curvature eccessive.

Gli elementi realizzabili possono essere catalogati in base alla curvatura: singola o doppia.

I pezzi a singola curvatura vengono formati con l'utilizzo di presse in un unico piano, con le lamelle disposte ortogonalmente.

I pezzi a doppia curvatura invece possono essere realizzati in due modi, in base al grado di curvatura desiderato: per livelli minori di curvatura, potranno essere utilizzate presse su più assi mentre, in caso di curvature maggiori, gli elementi vengono inizialmente piegati in un piano e successivamente vengono tagliati ortogonalmente, formando lamelle anche nella seconda direzione, quindi piegati nel secondo piano di curvatura. La sezione di elementi a doppia curvatura sarà quindi a griglia, e non a lamelle parallele, con spessore variabile in funzione del raggio di curvatura (Svilans, 2020).

Una volta formato l'elemento grezzo, questo verrà levigato per la finitura superficiale. È importante che l'elemento grezzo sia il più possibile fedele alla forma finale, in modo tale che con la levigatura non si ecceda il limite di angolo di taglio delle fibre, garantendo la massima resistenza possibile degli elementi [12].

Il sistema costruttivo proposto prevede elementi con le curvature minimizzate, senza torsione, per consentirne la realizzazione tramite piegatura attiva.

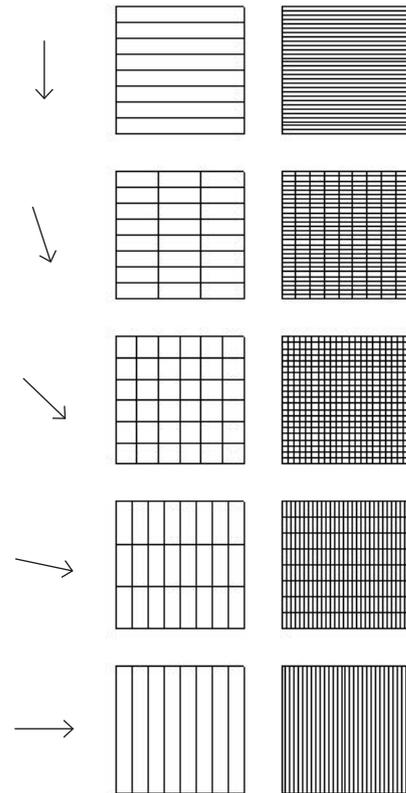


fig. 4.7\_ Sezione dell'elemento in base alla direzione e intensità di curvatura. (Svilans, 2020)

fig. 4.8\_ Pressa orizzontale semiautomatica per la curvatura di legno lamellare



## 4.2 STRUTTURA

---

Come anticipato nei paragrafi precedenti, le tracce del sistema digitale vengono tradotte in elementi lignei, a sezione rettangolare, orientati secondo la superficie guida.

Il dimensionamento della sezione avviene tramite l'utilizzo del software Karamba3D.

Una volta definiti i vincoli e le condizioni di carico, vengono impostate le dimensioni della sezione per tentativi, affinché gli spostamenti rilevati dall'analisi strutturale rientrino nel campo delle deformazioni ammissibili ( $L/200$ ).

Si ipotizza l'uso di legno lamellare GL26H.

Resistenza a flessione =  $26 \text{ N/mm}^2$

Resistenza a trazione =  $20.8 \text{ N/mm}^2$

Resistenza a compressione =  $26 \text{ N/mm}^2$

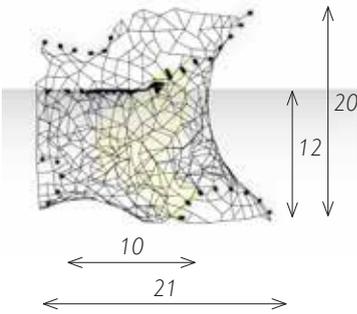
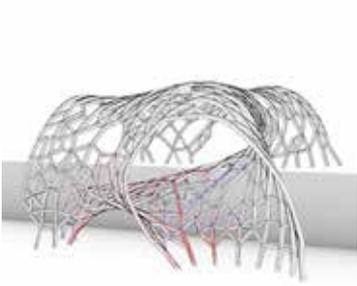
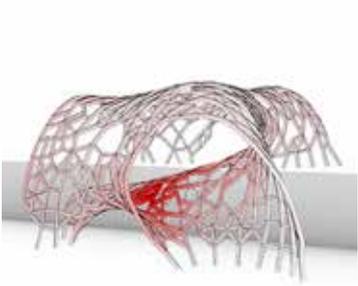
Modulo di elasticità =  $12\,100 \text{ N/mm}^2$

INPUT

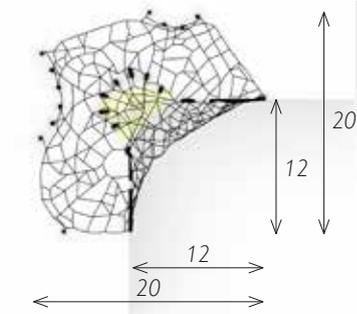
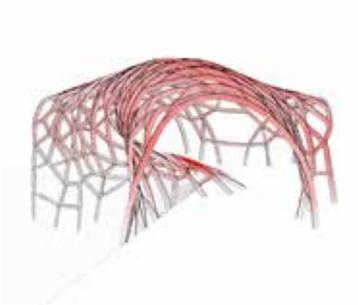
DEFORMAZIONI

SFORZO ASSIALE

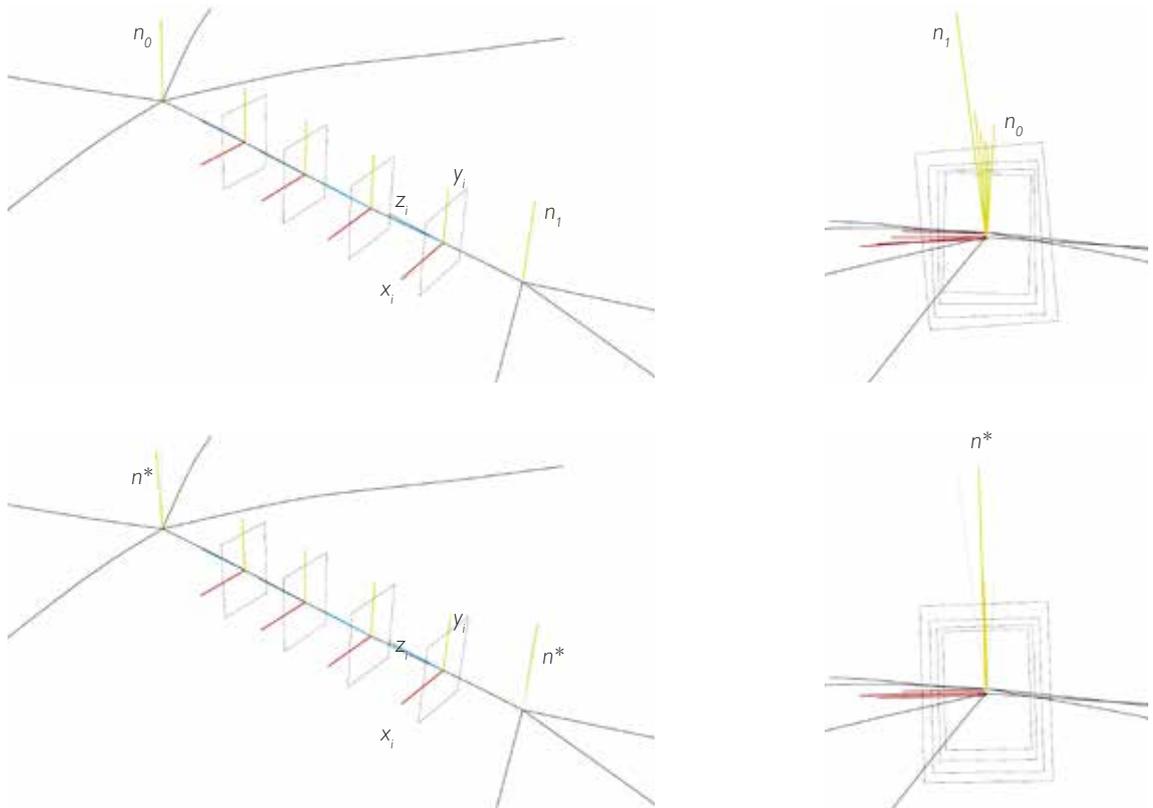
- Supports
- Mesh Loads (1 kN/m<sup>2</sup>)



Sezione 20 x 28 cm



Sezione 16 x 24 cm



## TORSIONE ELEMENTI

La generazione delle geometrie degli elementi direttamente dalle tracce e dalle normali alla mesh, dà luogo ad elementi con torsione. Per semplificare gli elementi, eliminando le torsioni, vengono aggiustati gli orientamenti delle sezioni in base a una media delle normali alla mesh ai nodi estremi, in modo tale da avere solo pezzi dritti, a singola e doppia curvatura, ma senza torsione.

Si effettua quindi una media delle normali alle estremità della traccia.

$$n^* = (n_0 + n_1) * 0.5$$

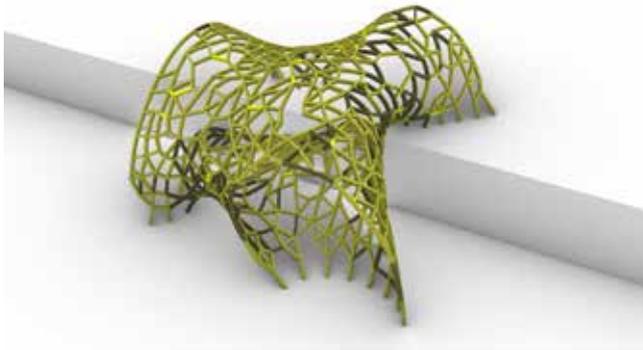
Successivamente si adattano le direzioni degli assi alla traccia per mantenere le sezioni ortogonali all'asse.

$$x_i = n^* \times z_i$$

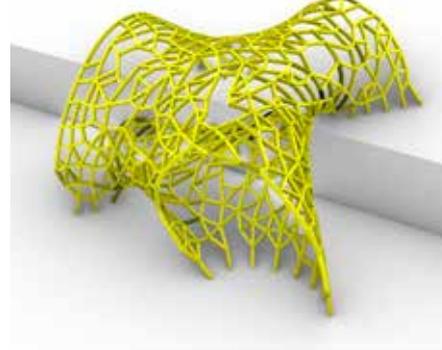
$$y_i = z_i \times x_i$$

Le differenze di orientamento saranno poi risolte con elementi ai nodi di collegamento.

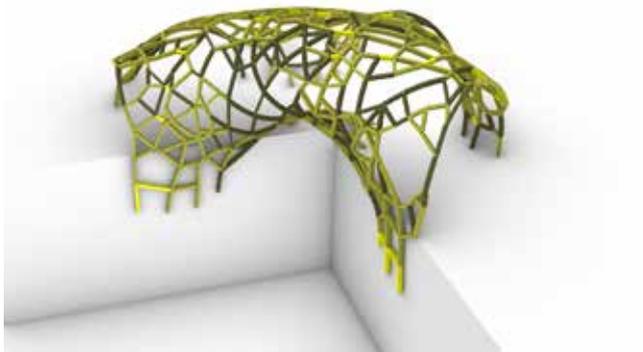
● Senza curvatura ● Singola curvatura ● Doppia curvatura



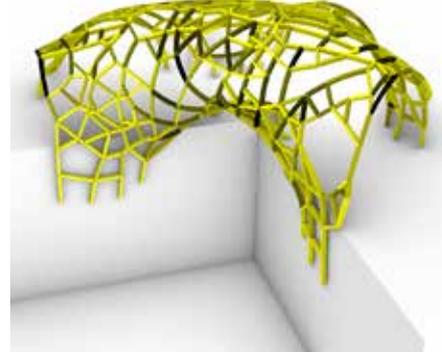
27 699 210



∞ 2.5 m



36 416 137



∞ 3.2 m

## CURVATURA ELEMENTI

Si riporta la classificazione degli elementi in base alla curvatura, calcolata secondo l'orientamento delle sezioni, nelle due direzioni ortogonali.

Si distinguono elementi dritti, a singola e doppia curvatura nella prima immagine, mentre nella seconda vengono colorati con gradiente in base al grado di curvatura medio di ogni pezzo.

Viene riportata in legenda la dimensione massima del raggio di curvatura nei due esempi. Si osserva come, soprattutto nel primo esempio, siano pochi gli elementi con raggi di curvatura minimi: in ogni caso ipotizzando per quegli elementi lamelle di 1 cm, si rimane entro i limiti di curvatura previsti (raggio curvatura = spessore lamelle/200).

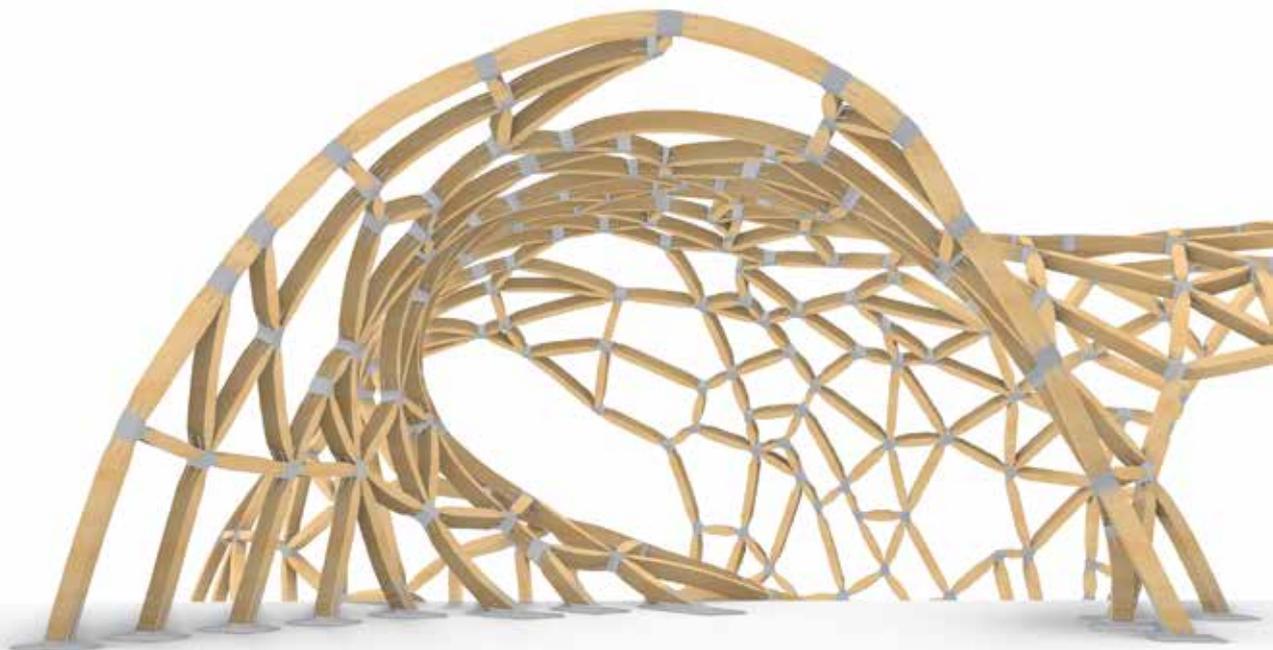


fig. 4.1 \_ Effetto struttura complessiva con nodo a elemento scatolare di raccordo.

## NODI

Gli elementi ai nodi devono fungere da raccordo per gli elementi, che vi confluiscono con orientamenti diversi.

Vengono pensate diverse soluzioni, non tutte compatibili con le diverse situazioni.

Tra le soluzioni più adatte se ne riportano due: una con elemento metallico di raccordo, l'altra con l'utilizzo di piastre.

### RACCORDO SCATOLARE

La prima opzione è costituita da un elemento scatolare metallico, alto quanto le travi, a cui vengono saldate piastre per il collegamento agli elementi in legno.

Per un miglior inserimento degli elementi al nodo, viene realizzata una rastrematura alle estremità, fino al dimezzamento della dimensione di base della sezione, in corrispondenza della zona in cui vengono inserite le piastre.



## PIASTRE

La seconda soluzione proposta crea un collegamento ai nodi mediante l'uso di piastre saldate. Viene previsto un corpo centrale (creato da piastre saldate) che fa da giunto tra le estremità degli elementi lignei nelle direzioni delle bisettrici degli angoli creati, a cui vengono ancorate due piastre per ogni elemento allineate con l'asse. L'ancoraggio avviene tramite bulloni, come per l'opzione precedente.

La soluzione del nodo non è una questione di facile soluzione, soprattutto nel caso in cui ogni elemento vi arrivi con un proprio orientamento.

Come si osserva dalle viste in alto, la prima soluzione è più pulita a livello geometrico, ma spezza la continuità della struttura in legno, mentre la seconda risulta meno impattante a livello globale, ma meno pulita localmente, soprattutto nei nodi in cui la differenza di orientamento tra i vari elementi afferenti risulta più evidente.

*fig. 4.2\_ Effetto struttura complessiva con nodi giuntati con piastre.*

RACCORDO SCATOLARE

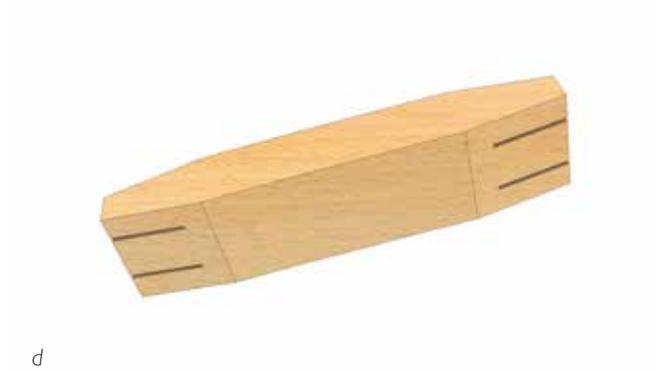
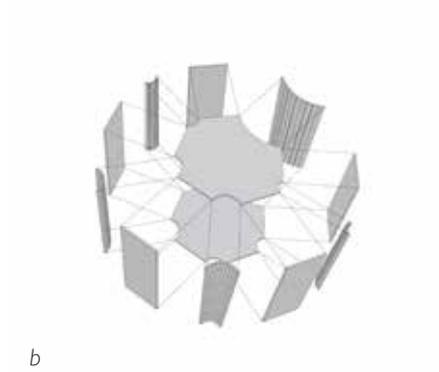
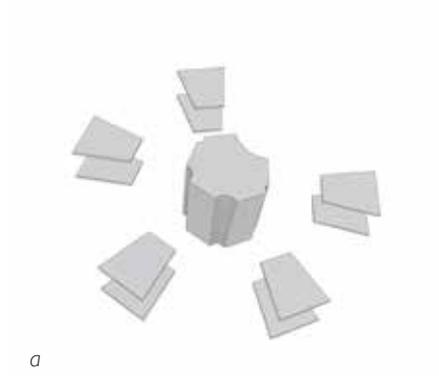


fig. 4.3\_ Dettaglio nodo con raccordo scatolare. (a) esploso dell'elemento e delle piastre, (b) esploso delle piastre componenti l'elemento scatolare, (c) nodo assemblato, (d) elemento in legno

PIASTRE

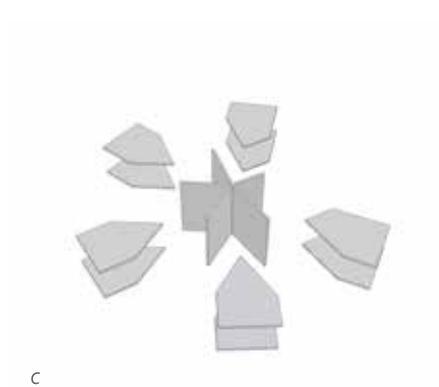
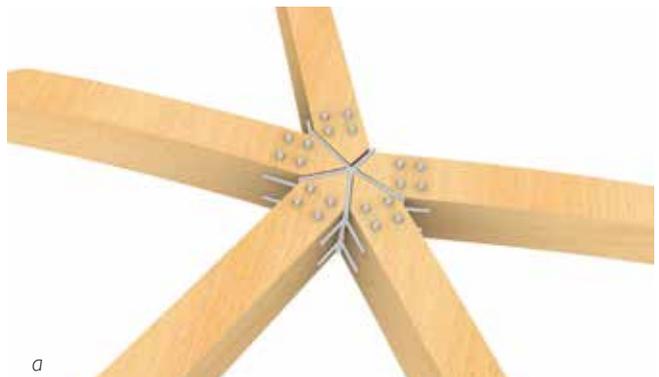
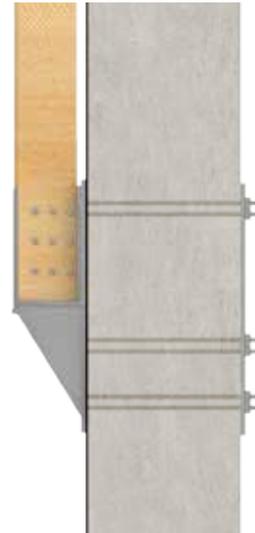
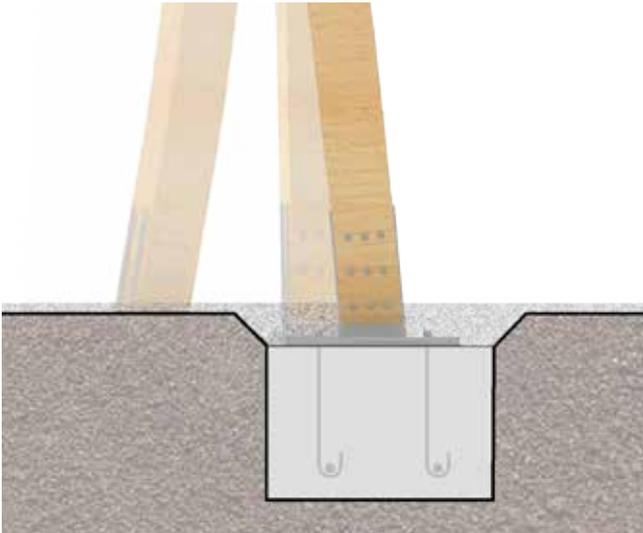


fig. 4.4\_ Dettaglio nodo giuntato con piastre. (a) nodo assemblato, (b) elemento in legno, (c) esploso delle piastre



## ATTACCO STRUTTURA

Le diverse strutture prevedono attacchi su piani orizzontali e verticali. Nel caso di attacchi su pareti di edifici esistenti si ipotizza che questi siano in grado di sopportare gli sforzi aggiuntivi.

Gli ancoraggi a terra vengono realizzati tramite piastre in acciaio, collegate con bulloni alla struttura in legno e tramite tirafondi a cordoli di fondazione interrati. La struttura di fondazione viene nascosta da ghiaia di riempimento.

L'elemento ligneo ancorato su pareti verticali è sostenuto da mensole in acciaio che scaricano il peso tramite piastre estese verticalmente, collegate alla parete tramite barre.

I dettagli riportati sono proposte ipotetiche, non sono state effettuati calcoli per il dimensionamento. La tipologia di ancoraggio dipende fortemente dal tipo di supporto e potrà essere opportunamente calcolata in base alle condizioni.

*fig. 4.5\_ Dettaglio dell'attacco a terra tramite cordolo di fondazione in cemento armato collegato alla struttura con piastre e tirafondi*

*fig. 4.6\_ Dettaglio ipotetico per l'ancoraggio a parete verticale esistente.*

## 4.3 RIVESTIMENTO

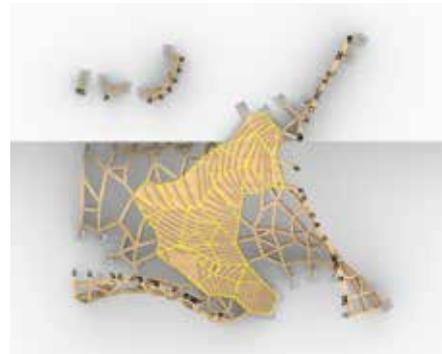
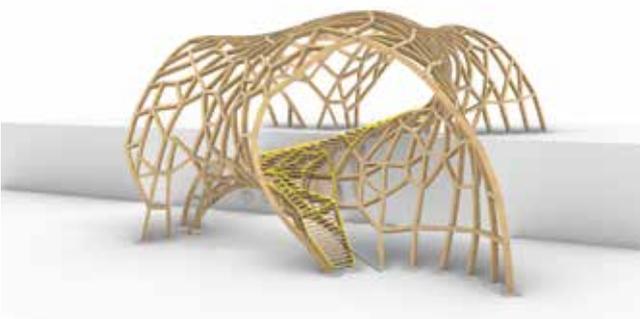
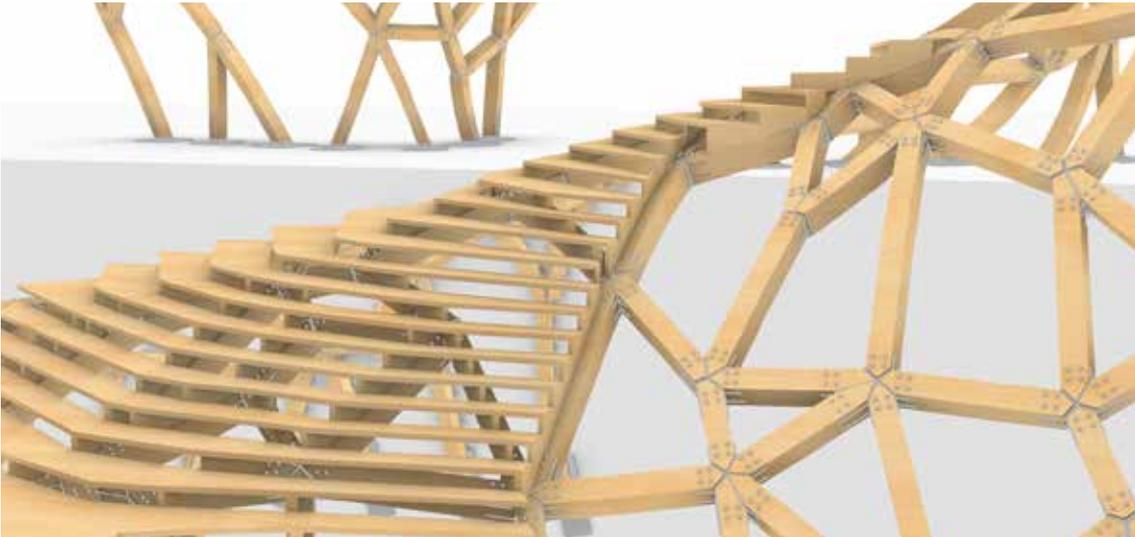
---

Per quanto riguarda il rivestimento, viene fatta una distinzione in base alle celle create dalla struttura, alcune dedicate alle parti percorribili, in cui vengono inseriti dei gradini (non avendo parti piane), mentre per le altre, non calpestabili, vengono pensate diverse soluzioni: lamelle in legno, lamiera stirata e membrana in tessuto.

Non avendo a che fare con celle planari, viene definita una rigatura per ogni cella, che va a definire le direzioni di riferimento per il rivestimento.

Per i gradini vengono considerate le curve di iso-livello, determinate dall'intersezione dei bordi delle celle con piani orizzontali a distanze definite.

Per il resto del rivestimento la rigatura è definita da una curva che rappresenta l'andamento dei percorsi all'interno della struttura: per ogni cella viene definita una direzione principale.



## PARTE PERCORRIBILE

La selezione delle celle destinate all'inserimento di gradini viene fatta mediante la definizione di una distanza massima tra i centri delle celle e il punto più vicino sulla curva.

Per ogni cella quindi si vanno a definire le linee generatrici, mediante l'intersezione del perimetro con piani paralleli orizzontali (distanza 17 cm).

I gradini vengono realizzati con tavolati in legno, sagomati secondo le varie celle, montati sulle travi tramite elementi di mediazione, anch'essi in legno, tra gradino e trave che vanno a compensare i dislivelli.

Per altri esempi di strutture i gradini avranno distanze maggiori per creare delle sedute con gli stessi criteri.

fig. 4.1\_ Vista struttura con gradinata

fig. 4.2\_ Definizione delle celle destinate all'inserimento di gradini e vista dall'alto.

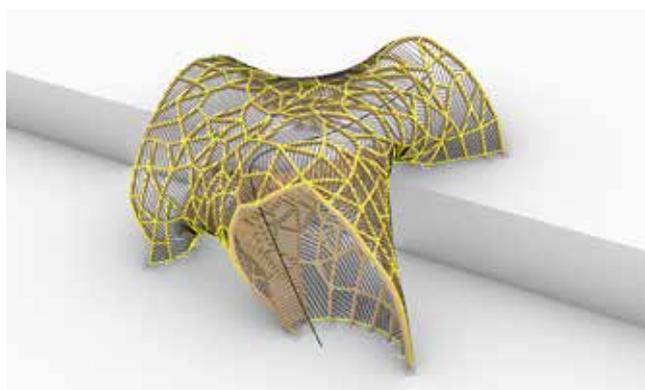
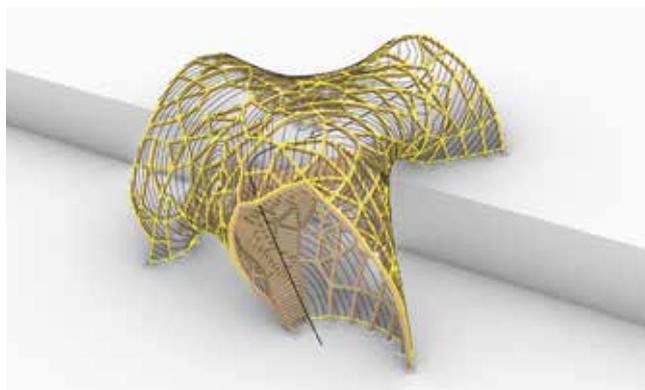
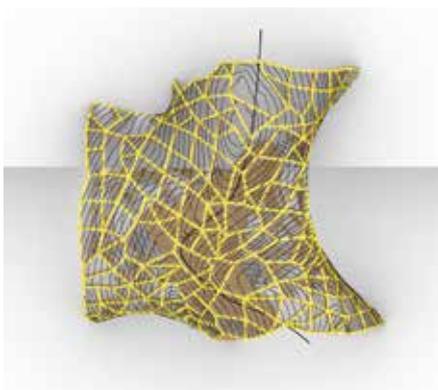


fig. 4.3\_ Celle destinate al rivestimento non calpestabile, definizione pattern.  
 (sopra) Curve di isolivello rispetto alla distanza del centro delle celle dal punto più vicino sulla curva.  
 (sotto) Linee a distanza costante che definiscono la direzione di rigatura per ogni cella.

Per la creazione delle isocurve si utilizza il componente MeshIsoCurve, del plugh-in di Grasshopper froGH (Co-de-iT). L'input necessario è una mesh colorata secondo i parametri desiderati: quindi ogni mesh, definita dai bordi di ogni cella, viene colorata con gradiente in base alla distanza dei vertici dal punto più vicino alla curva. Dal gradiente di colore quindi, il componente definisce le isocurve, secondo intervalli definiti.

Per ogni cella viene calcolata la direzione media data dai vettori tangenti alle curve del pattern, che viene usata per la creazione di piani paralleli ortogonali alla mesh, da cui si ricavano le intersezioni coi bordi delle celle, quindi le linee di rigatura.

Tali linee possono essere equidistanti o con distanza variabile secondo determinati criteri di progettazione e in base al tipo di rivestimento scelto.



## LAMELLE

Le lamelle pensate per la prima opzione di rivestimento sono in legno, collegate all'estradosso delle travi, tramite L metalliche.

Il passo delle lamelle è variabile in funzione dell'orientamento della cella: per le celle verticali è maggiore, mentre per quelle orizzontali è minore, avendo così una miglior schermatura solare in copertura.

L'utilizzo delle lamelle in legno porta all'unitarietà di materiale della struttura, senza però avere alcun riparo in copertura, se non rispetto alla luce.

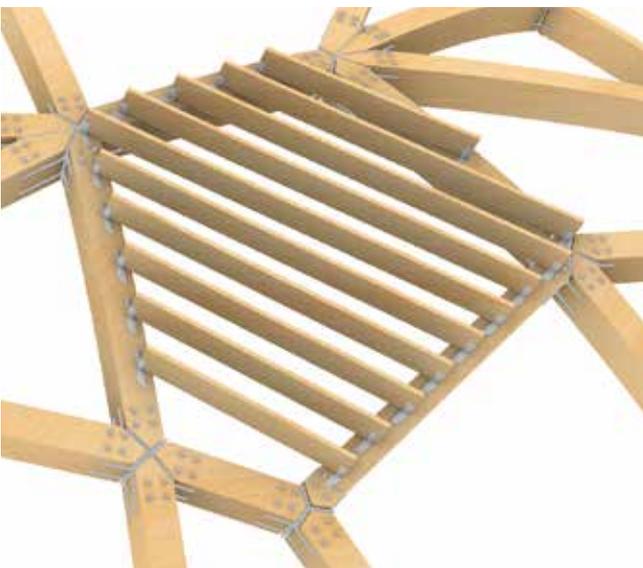


fig. 4.4\_ Dettaglio dei rivestimento con Lamelle in legno su cella tipo

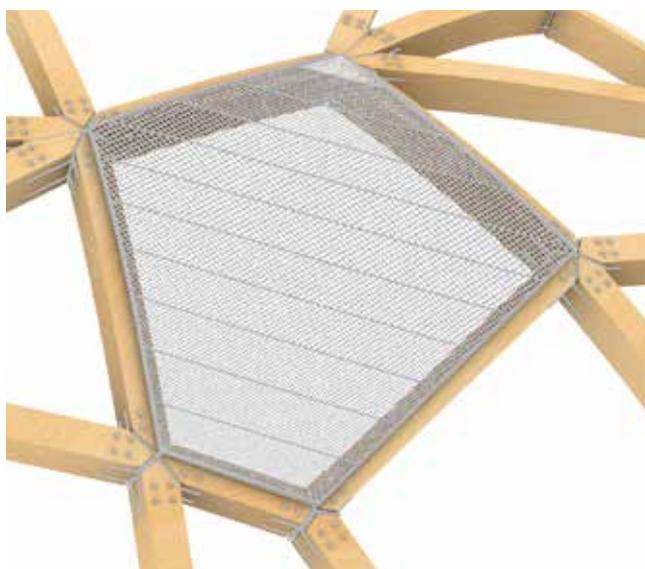


## LAMIERA STIRATA

La seconda opzione di rivestimento prevede l'utilizzo di strisce di lamiera stirata, montate secondo la rigatura illustrata precedentemente, su un telaio metallico ancorato all'estradosso delle travi. La flessibilità della lamiera consente un adattamento alle curvature della struttura.

La lamiera stirata, grazie alla traforatura, conferisce un effetto di trasparenza e leggerezza al rivestimento; allo stesso tempo il pattern viene messo in risalto dai giochi di riflessione della luce creati dal metallo.

*fig. 4.5\_ Dettaglio del rivestimento con lamiera su cella tipo*

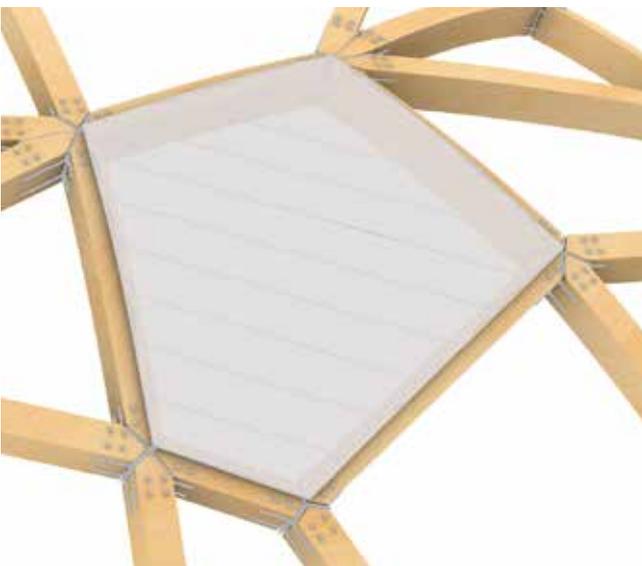




## MEMBRANA

L'ultima opzione proposta consiste nell'utilizzo di membrane in tessuto in tensione, sostenute da un telaio metallico ancorato all'estradosso delle travi. Il telaio è costituito da un bordo esterno, corrispondente al perimetro della cella, e da elementi paralleli disposti secondo la rigatura delle celle.

Si propone l'uso una membrana semitrasparente bianca impermeabilizzata, per consentire un maggior riparo rispetto alle opzioni precedenti, mantenendo l'effetto di semitrasparenza e leggerezza voluto.



*fig. 4.6\_ Dettaglio dei rivestimento con membrana in tessuto su cella tipo*



# **5 APPLICAZIONE ARCHITETTONICA**





\_\_Renders realizzati con Rhino6+Enscape























# CONCLUSIONI

---

La ricerca ha esplorato le potenzialità architettoniche di una struttura ramificata generata tramite l'uso di un sistema multi-agente, partendo da un ipotetico contesto esistente.

A partire da una ipotesi iniziale di generazione spaziale della struttura tramite regole di sviluppo del sistema basate su esigenze architettoniche e strutturali, durante lo sviluppo del sistema digitale sono emerse importanti criticità riguardo alla gestione delle diverse variabili e alla traduzione geometrica dei nodi. È stato necessario imporre ulteriori vincoli al sistema, tra i quali l'imposizione di uno sviluppo monosuperficie.

Il pattern generato dal sistema risulta fortemente influenzato da fattori quali la conformazione della superficie guida, la distribuzione degli attrattori e la scelta dei punti di partenza. Sono state inserite variabili per un maggior controllo del risultato, quali angolo di ramificazione e lunghezza minima e massima dei rami, rendendo evidente la variazione dell'angolo, mentre le dimensioni di lunghezza influiscono sulla densità del pattern.

Per una più semplice traduzione geometrica delle tracce in un diagramma unifilare, è necessaria una fase di post-produzione per eliminare tracce ridondanti e/o incoerenti; al momento l'algoritmo di post-produzione modifica, in alcuni casi in modo evidente (a seconda delle tolleranze impostate), il pattern generato inizialmente dal sistema. Una possibile futura implementazione potrebbe riguardare l'affinamento del sistema di generazione digitale per ridurre l'incidenza della fase di post-produzione.

Le prestazioni strutturali globali sono dipendenti principalmente dalla forma della superficie guida, con un miglior funzionamento con doppie curvature distribuite. A livello locale, la connettività tra i rami è estremamente variabile nelle diverse strutture, con un'influenza parziale dei parametri di comportamenti degli agenti. Per una collaborazione strutturale ottimale è importante una buona connessione tra gli elementi, ma quest'aspetto allo stato attuale non

è sempre controllabile, data la varietà di andamento dei rami ed anche a causa della pulizia successiva delle ridondanze.

La scelta del legno lamellare formato tramite piegatura attiva come sistema costruttivo ha imposto la rimozione della torsione negli elementi; di conseguenza, si accumulano criticità maggiori ai nodi, dovendo questi mediare tra elementi orientati diversamente. Le soluzioni proposte sono frutto di compromessi tra coerenza geometrica e riduzione delle discontinuità materiali; allo stato di sviluppo corrente non è quindi stato possibile trovare una soluzione ottimale che tenesse conto di tutte le esigenze e condizioni imposte. La soluzione dei nodi da adottare rimane quindi una questione aperta, le cui scelte possono dipendere da esigenze pratiche legate a fattori contestuali e circostanziali della singola istanza di progetto quali sistemi di produzione, economie, know how, clima, etc..

Tra e possibili direzioni di sviluppo futuro, quella con maggiore possibilità di legare la ricerca alla realizzazione è sperimentare la compatibilità di ulteriori tecniche costruttive, per avere un quadro più ampio di possibilità che tengano conto di diverse esigenze.





## BIBLIOGRAFIA

---

- \_Gianoli E., «The behavioural ecology of climbing plants». *AoB PLANTS* 7 (February 2015)
- \_Hädrich T., Bedrich B., Deussen O., Pirk S., «Interactive Modeling and Authoring of Climbing Plants», *EUROGRAPHICS 2017 / L. Barthe and B. Benes, Volume 36(2017), no. 2*
- \_Hua H., Hovestadt L., Tang P., «Optimization and prefabrication of timber Voronoi shells», *Structural and Multidisciplinary Optimization* (May 2020)
- \_Isnard S., Silk W. K., «Moving with climbing plants from Charles Darwin's time into the 21st century». *American Journal of Botany* 96(7): 1205–1221, 2009.
- \_Johnson, Steven. *Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software*. New York: Scribner, 2001.
- \_Melzer B., Steinbrecher T., Seidel R., Kraft O., Schwaiger R., Speck T., «The attachment strategy of English ivy: A complex mechanism acting on several hierarchical levels», *Journal of The Royal Society Interface* (May 2010): 1383-1389
- \_Menges A., «Integrative Design Computation integrating material behaviour and robotic manufacturing processes in computational design for performative wood constructions», *ACADIA 2011, Stuttgart University, Harvard University*
- \_Poinet P., «Enhancing Collaborative Practices in Architecture, Engineering and Construction through MultiScalar Modelling Methodologies» (PhD Thesis, The Royal Danish Academy of Fine Arts Schools of Architecture, Design and Conservation, 2019)
- \_Runions A., «Modeling Biological Patterns using the Space Colonization Algorithm, Department of Computer Science» (Thesis, University of Calgary, 2008)
- \_Runions A., Fuhrer M., Lale B., Federl P., Rolland-Lagan A.-G., Prusinkiewicz P., «Modeling and visualization of leaf venation patterns». *ACM Transactions on Graphics* 24, 3(2005): 702–711.
- \_Svilans T., «Integrated material practice in free-form timber structures» (PhD Thesis, The Royal Danish Academy of Fine Arts Schools of Architecture, Design and Conservation, 2020)

# SITOGRAFIA

- [1] <http://spatial-slur.blogspot.com/2012/06/mouldynetworks.html>
- [2] [https://www.sapere.it/enciclopedia/g%C3%B9scio.html#:~:text=Struttura%20a%20guscio%2C%20struttura%20portante,%2C%20conoidi%2C%20paraboloidi%20iperbolici\).](https://www.sapere.it/enciclopedia/g%C3%B9scio.html#:~:text=Struttura%20a%20guscio%2C%20struttura%20portante,%2C%20conoidi%2C%20paraboloidi%20iperbolici).)
- [3] [http://people.dicea.unifi.it/emarino/didattica/Meccanica\\_Computazionale/seminari/Ottimizzazione\\_Ricerca\\_Forma\\_Gusci/Ottimizzazione\\_Ricerca\\_Forma\\_Gusci.pdf](http://people.dicea.unifi.it/emarino/didattica/Meccanica_Computazionale/seminari/Ottimizzazione_Ricerca_Forma_Gusci/Ottimizzazione_Ricerca_Forma_Gusci.pdf)
- [4] <https://www.infobuild.it/approfondimenti/progettare-legno-cosa-sono-gridshell/>
- [5] <https://theverymany.com/>
- [6] [medium.com/@jason.webb](https://medium.com/@jason.webb)
- [7] [www.wikipedia.it](http://www.wikipedia.it)
- [8] <https://www.youtube.com/channel/UCUJgViAduAoRsf89ZtyF8dQ>
- [9] [github.com/gradientspace/geometry3Sharp/](https://github.com/gradientspace/geometry3Sharp/)
- [10] [github.com/tsvilans/glulamb](https://github.com/tsvilans/glulamb)
- [11] *Veritas Steam-Bending Instruction Booklet (leevalley.com)*
- [12] <https://www.lehmann-gruppe.ch/en/news/allgemein/fabricate-2020.html>







