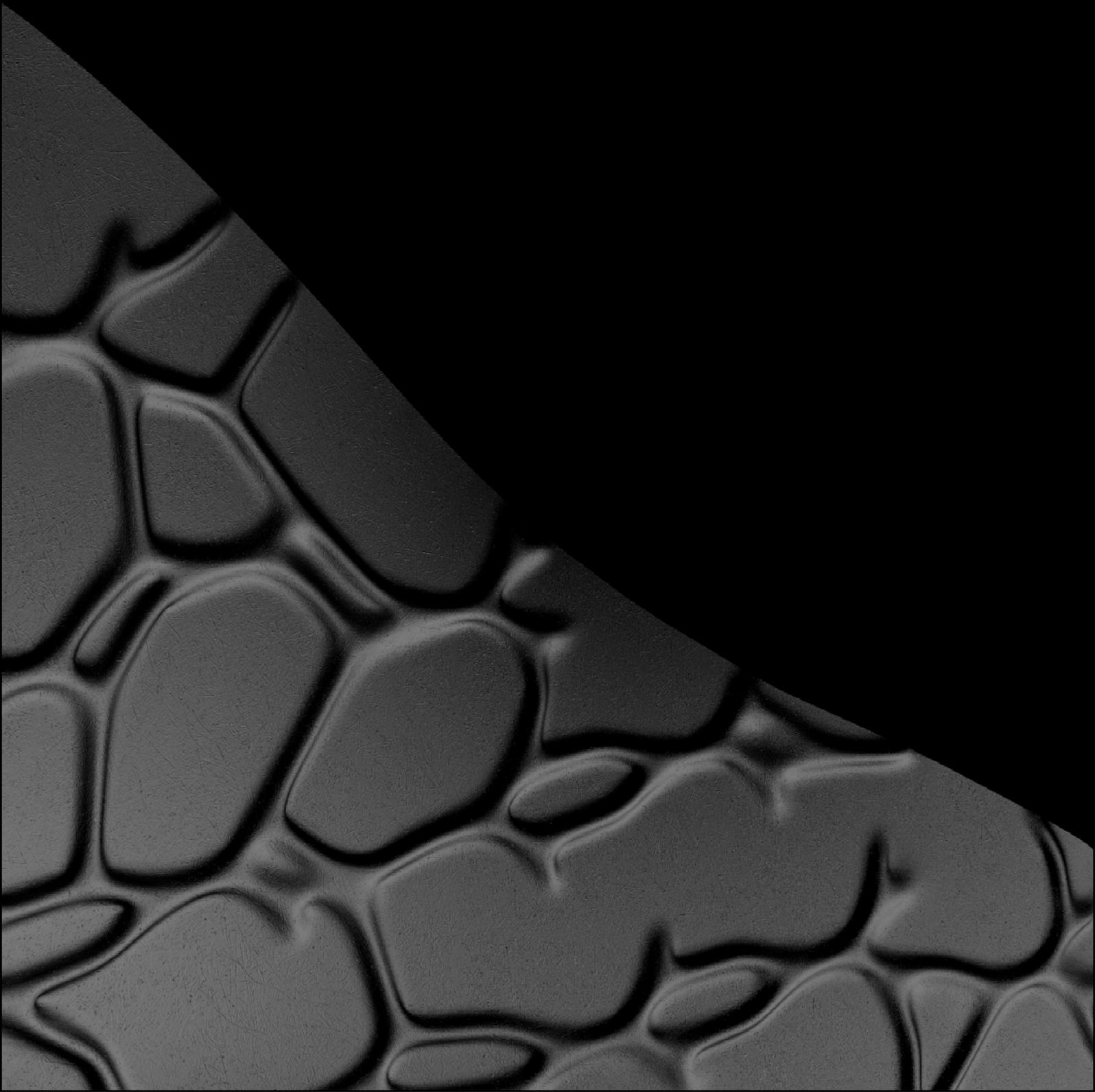


# DEEP TRAILS

progettazione computazionale di tettoniche di superficie in materiale fibrocomposito  
mediante combinazione di processi di auto-organizzazione e  
ottimizzazione strutturale





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

## **DEEP TRAILS**

progettazione computazionale di tettoniche di superficie in materiale fibrocomposito  
mediante combinazione di processi di auto-organizzazione e ottimizzazione strutturale

Relatore:  
Prof. Alessio Erioli

Tirocinio per tesi:  
ARUP Italia - Correlatore: Arch. Vito Sirago

Candidato:  
Gianluca Casalnuovo

aa 2020-2021  
Prima sessione



# .CONTENUTI

0. ABSTRACT

1. INTRODUZIONE

2. BACKGROUND TEORICO

. emergence

. path systems

. ornament

. simulazione e algoritmo

3. DESIGN PROCESS

. stigmergy

. physarum polycephalum

. sistema digitale

. Is-Dyna

. agentBody

5. MATERIALI E

FABBRICAZIONE

6. APPLICAZIONE

ARCHITETTONICA

7. CONCLUSIONI



# 0. ABSTRACT

Con questa tesi di ricerca si esplorano le potenzialità costruttive ed espressive generate dall' influenza reciproca di design algoritmico e simulazione strutturale.

Alla base di questa ricerca vi è lo studio di processi stigmergici simulati attraverso dei sistemi multi-agente, infatti la popolazione di agenti, usando semplici comportamenti locali basati sulla chemiotassi, forma spontaneamente complesse e dinamiche reti di trasporto, che incorporano effetti quasi-fisici simili alla tensione superficiale. Ciò comporta la nascita di un fenomeno emergente, non specificato dall' algoritmo dell' agente, che permette l'eliminazione di percorsi ridondanti all' interno della rete, riducendola ad un sistema di percorso minimizzato.

Ne segue uno studio di come le proprietà multi-agente possano essere incorporate in un livello di geometria più alto e, per non limitare la figura dell' agente ad un punto, sono stati introdotti all' interno del sistema dei piani che, attraverso semplici regole di interazione a livello locale e con il sistema chemiotattico, permettono la formazione di strutture superficiali complesse.

Attraverso analisi strutturali eseguite con l'ausilio di un software di simulazione NLTH, sono state individuate le zone della superficie con i più alti valori di stress. Esse vengono trattate con un sistema di ornamento che non ha solo accezione decorativa, ma che contribuisce, ad assemblaggio concluso, ad aumentare la performance strutturale del prodotto finale. Si viene a creare un' unica struttura la cui efficienza strutturale è strettamente dipendente dal contributo di entrambe le parti.

Si è scelto di impiegare materiali compositi in GFRP per la simulazione strutturale e la realizzazione delle superfici, materiali che garantiscono un' elevata leggerezza e resistenza meccanica.

Il mold necessario per la stratificazione del GFRP è stato suddiviso in porzioni, ottenute per fresatura.



# 1.0 INTRODUZIONE

## ARCHITETTURA E COMPUTAZIONE

La computazione è un complice necessario per lavorare con sistemi complessi, ma in architettura sono stati adottati metodi computazionali che privilegiano la certezza rispetto a processi aperti. Questa adozione si basa su una serie di falsi presupposti riguardanti la natura pseudo-oggettiva del computational design. Questi sistemi di variazione e ottimizzazione parametrica sono complici dell'automazione della progettazione, marginalizzando il rischio, e mettendo in primo piano la stabilità e l'equilibrio.

La formazione comportamentale è presentata come una metodologia di progettazione algoritmica non lineare che semina uno specifico intento architettonico all'interno delle interazioni locali dei sistemi multi-agente.

L'instabilità di un sistema permette l'emergere di un ordine che è radicalmente diverso dalle sue condizioni iniziali.

Il tema computazionale è riferito molto di più ad una metodologia che all'adozione di un tipo di strumento (software).

Non è altro che la costruzione di modelli che mettono in modo proprietà di diversi generi, attraverso i quali si arriva alla generazione di qualcosa che non è possibile concepire altrimenti.

Gli studi di Gaudì per la Sagrada Família, emblematico il modello delle catenarie, che sfrutta il principio della curva della catenaria, sono già degli esempi di design computazionale.

Gaudì ottiene un risultato estremamente complesso, quasi impossibile da concepire disegnandolo manualmente, sfruttando un modello geometrico-matematico.

Possiamo definire Gaudì un architetto computazionale durante i suoi lavori sulla Sagrada Família perché non lavora con una concezione a priori, ma utilizza modelli per arrivare alla concezione del proprio progetto.

Questione diversa riguarda il tema del computerizzato, che si riferisce all'utilizzo di un computer come accessorio per un metodo di lavoro che si basa sulla concezione dell'architetto come creatore e supervisore della forma. (Frank Gehry, Golden Fish, 1992).

**1.0.1.** Sotto: modello delle catenarie.  
Antoni Gaudì, 1914.





**1.0.2.** *Sopra: Golden Fish.*  
*Frank Gehry, 1992.*

La dipendenza di base dei sistemi complessi dal feedback ha reso la computazione una rete indispensabile nella generazione e simulazione della complessità. Gli architetti, tuttavia, hanno in gran parte relegato la computazione al servizio del controllo esplicito.

All' interno dell'architettura, il computational design può essere descritto attraverso diverse categorie generali: modellazione parametrica, ottimizzazione, ricerca di forme e algoritmi generativi. Le prime tre categorie sono intrinsecamente basate sulla stabilità, o sulla ricerca dell'equilibrio, mentre l'ultima espone il potenziale dei sistemi complessi aperti. La necessità del rischio e dell'indeterminatezza nella progettazione non è riducibile alla dicotomia di sistemi lineari e non lineari, ma più precisamente definita dall' opposizione di stabilità e volatilità.

Il design generativo può essere descritto progettando i processi di progettazione piuttosto che l'artefatto, implicando un'astrazione del designer dall'artefatto.



## 2.1 BACKGROUND TEORICO

### EMERGENCE E AUTO-ORGANIZZAZIONE

“Non è magia”, ha detto una volta il fisico Do-  
yne Farmer a proposito del fenomeno noto come  
emergenza, “ma sembra una magia”. Creature,  
città e tempeste si auto-organizzano, con rego-  
le di basso livello che danno origine ad ordini di  
livello superiore, facendo emergere proprietà e  
comportamenti completamente nuovi, senza che  
nessuno li diriga e nessuno sia in grado di pre-  
vedere le nuove caratteristiche dalla sola cono-  
scenza dei costituenti. Il tutto è veramente più  
grande della somma delle sue parti.

**2.1.1.** *A lato: Fiocco di neve visto attraverso  
un microscopio elettronico.  
Wired.com*



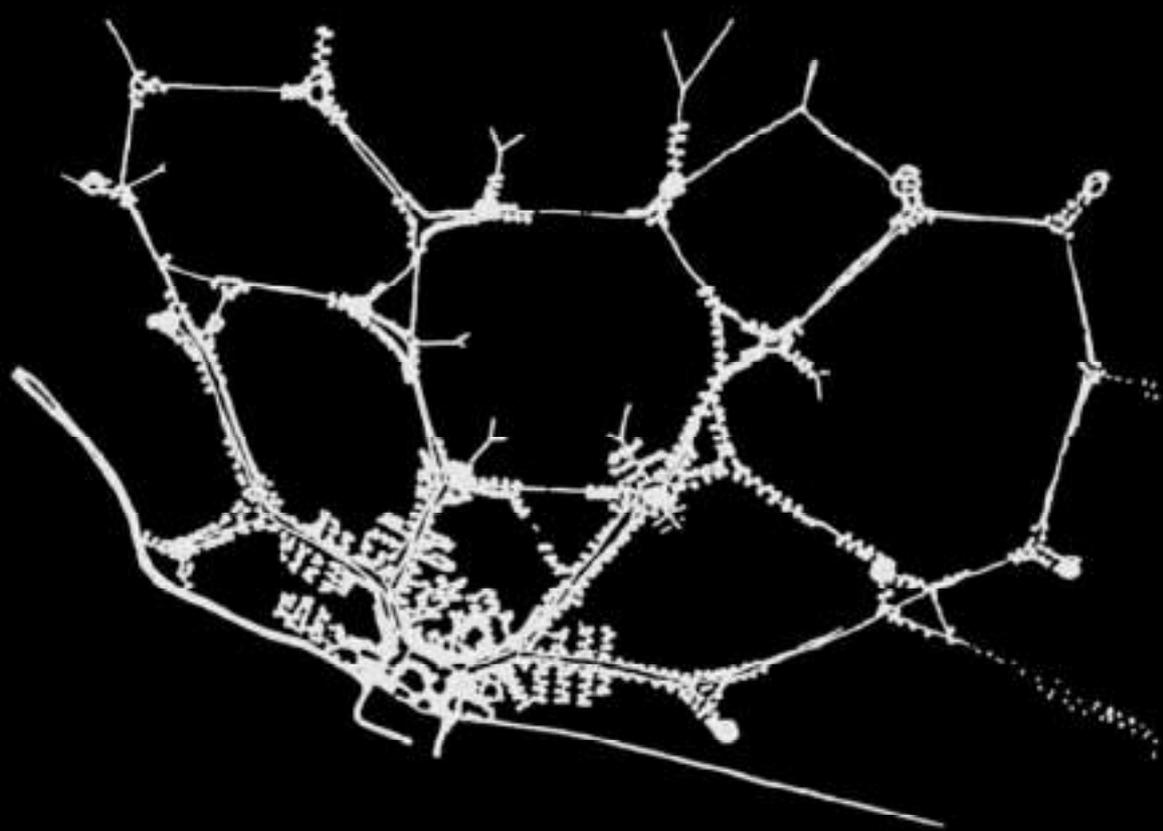
Uno stormo di uccelli che volano in perfetta sincronia o un banco di pesci in acqua sono alcuni dei fenomeni riconducibili ad uno schema emergente. L'armonia regna, generando un comportamento (l'affollamento, con il suo movimento rapido e gli improvvisi cambiamenti di rotta) che non è prevedibile conoscendo tutto quello che c'è da sapere su ogni singola entità del gruppo. L'organizzazione "emerge" da semplici regole basate su rapporti di vicinato come la distanza dai vicini da mantenere entro un range di distanze o l'allineamento con la direzione media delle velocità dei vicini per evitare l'isolamento dal gruppo.

**2.1.2.** *Sopra: Stormo di uccelli in volo.*  
*National Geographic.*

**2.1.3.** *Sotto: Banco di Bigeye scad.*  
*National Geographic.*







## 2.2 BACKGROUND TEORICO

### OCCUPAZIONE E CONNESSIONE

Lo studio dei “percorsi minimi” è stato uno dei primi argomenti di ricerca dell’Institut für leichte Flächentragwerke della Technische Hochschule di Stoccarda, appena fondata nel 1964.

Reti, percorsi, connessioni, nodi e aree occupate attraversano tutto il nostro ambiente naturale e tecnico creandolo e influenzandolo. Reti, percorsi, connessioni, nodi e aree occupate

La conoscenza dell’ occupazione e la connessione è quindi una chiave per comprendere i contesti storici e moderni.

Facendo riferimento al lavoro sviluppato all'istituto per strutture leggere (IL), Frei Otto presenta in *Occupying and Connecting* (2009) una teoria sui fenomeni delle reti urbane come sistemi auto-organizzati, occupazioni di superfici e percorsi, ed espansione dei territori.

Tutte queste strutture spontanee crescono attraverso dei processi fondamentali che organizzano tutti gli spazi naturali e umanizzati: occupazione e connessione. Governati da leggi di attrazione/repulsione o espansione/contrazione, presentano un comportamento di emergenza e auto-organizzazione simile ai processi fisici di modelli naturali.

Questi fenomeni sono stati illustrati attraverso esempi estratti dal mondo naturale, sociale e tecnologico, e in una serie di esperimenti di ricerca di forme fisiche, studiati in IL tra gli anni 60 e 80, usando aghi magnetizzati, bolle di sapone, sabbie o fili bagnati.

Questi modelli sperimentali di occupazione e connessione (sistemi di percorsi) sono riassunti di seguito:

Repulsione o occupazione della distanza: L'equilibrio delle forze magnetiche genera griglie triangolari spontanee la cui regolarità aumenta con quantità crescente di aghi.

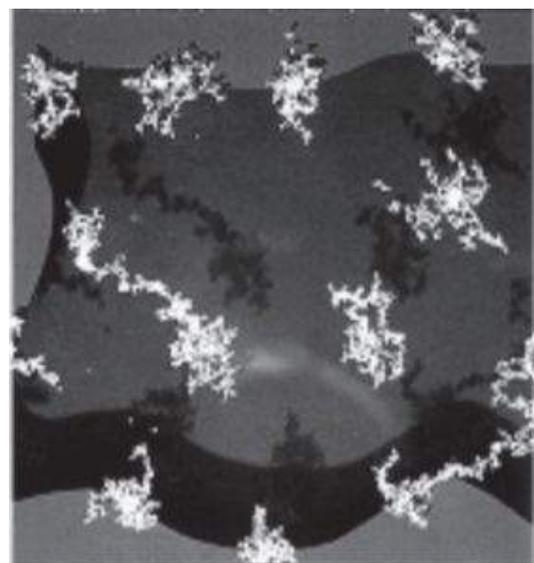
Attrazione Occupazione: Esperimenti con un dispositivo che produce bolle d'aria o di sapone di dimensione costante. Queste si organizzano da sole in una disposizione esagonale ottimale: il processo di formazione del modello è simile al precedente, salvo che questo raggiunge la massima densità.

Occupazione simultanea di repulsione e attrazione: Modello che combina i primi due: piccole bolle o chip di polistirolo si agglomerano intorno ad aghi magnetizzati che detengono un'occupazione di repulsione.



**2.2.2.** *Sopra: Apparato per repulsione o occupazione della distanza. Occupying and Connecting. Frei Otto, 2008.*

**2.2.3.** *Sotto: Apparato per occupazione simultanea di repulsione e attrazione. Occupying and Connecting. Frei Otto, 2008.*





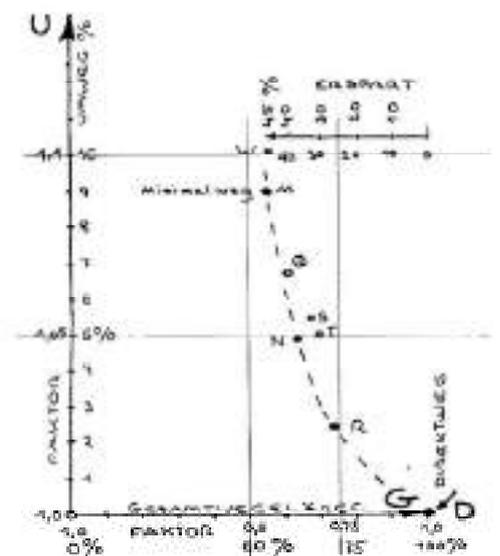
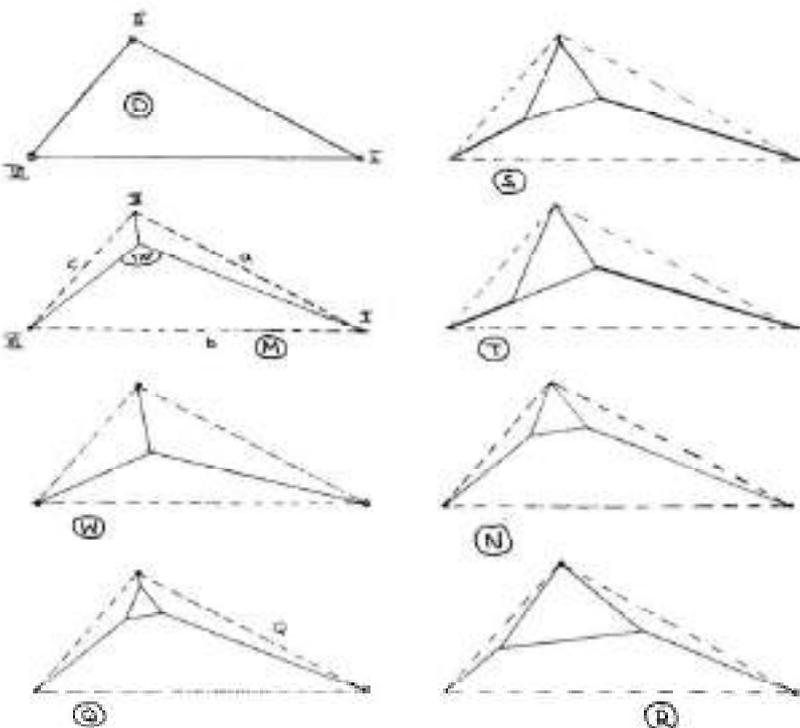
Sistema di percorso diretto: È un sistema in cui il trasporto avviene senza deviazioni, e non ci sono ramificazioni. Come un'idealizzazione, è usato come punto di partenza dei modelli di percorso minimizzato di deviazione.

Sistema di percorso minimo (modello a pellicola di sapone): Collega un insieme di punti lungo il percorso più breve (albero di Steiner euclideo minimo). Si generano nuovi punti (punti di Steiner) che sono sempre nodi con 3 spigoli che formano angoli di  $120^\circ$  tra loro.

Sistema di percorsi minimi di deviazione (modello del filo bagnato): I sistemi precedenti rappresentano due soluzioni estreme, presentando grandi vantaggi ma anche svantaggi in termini di lunghezza e deviazione. Schaur (1992) presenta un modello sperimentale per ottenere sistemi di percorsi di deviazione minimizzati: un sistema di percorso diretto del filo viene rilassato con una lunghezza extra, corrispondente alla massima deviazione consentita, e poi la struttura viene immersa in acqua la cui tensione superficiale costringe i fili a legarsi e troncarsi, ottenendo una rete più corta. Esso combina i vantaggi dei due sistemi precedenti: lunghezza e deviazione sono ottimizzati, ed emerge un gruppo chiaramente riconoscibile di forme autogenerate.

**2.2.4.** Sopra: sistema di percorsi diretto, minimo e a deviazioni minimizzate. *Occupying and Connecting.* Frei Otto, 2008.

**2.2.5.** Sotto: metodo di visualizzazione schematica in cui i possibili processi di ottimizzazione nei sistemi di percorso potrebbero essere resi otticamente plausibili. *Kraft und Masse.* Prinzip Leichtbau, 1980





## 2.3 BACKGROUND TEORICO

### ORNAMENTO

Adolf Loss nel saggio "Ornament and Crime" espone una sua teoria in cui si privilegia l' utilità della produzione di oggetti di forma semplice e funzionale. L' ornamentazione sugli edifici viene vista come puerile ed inutile, un eccesso assolutamente evitabile.

Tutto nasce da una nozione precedente, una concezione di tipo albertiana in cui esiste un dualismo tra le due concetti incogliabili, astrazione ed empatia, ai quali corrispondono rispettivamente, a livello architettonico, struttura e ornamento.

Struttura vista come portatrice di verità, per poi essere immediatamente celata dall' ornamento.

Conseguenze dell' impostazione classica sono rappresentate dall' interpretazione del moderno, che rigetta l' ornamento in favore della nudità o dall' interpretazione del po-mo, che rovescia il discorso del' ornamento come forma di mascheramento.

Una terza via rispetto alle interpretazioni del moderno e po-mo è la concezione di John Ruskin, che vede l' ornamento come qualcosa che riesce a connettere delle relazioni su più scale.

Affascinato dalle linee e dai pattern che si formano nelle formazioni rocciose, scrive: "Linee di questo tipo sono stupende, [...] perchè quasi tutte queste linee sono espressione di azioni o forze di qualche tipo, mentre il cerchio è una linea di limitazione o supporto". Ruskin traccia una terza via nel dilemma tra struttura e ornamento nel momento in cui relaziona la presenza di questi pattern ornamentali come espressione di forze e processi agenti ad una scala più interna.

Analizzando la parola "ornamento" dal punto di vista etimologico, è composta dalla radice "ar", che significa mettere insieme, armonizzare, articolare due parti diverse, trovare un modo di passare informazioni tra una parte e l'altra, quindi molto lontano dalla condizione puramente "decorativa" e superflua descissa da Loss, al contrario è una condizione assolutamente necessaria ogniqualvolta si verificano relazioni tra assemblaggi di parti.

Forma, processo e ornamento sono in realtà interdipendenti, quindi risulta concettualmente errato limitare la concezione dell'ornamento ad un pattern decorativo senza alcuna relazione con forma e processo.

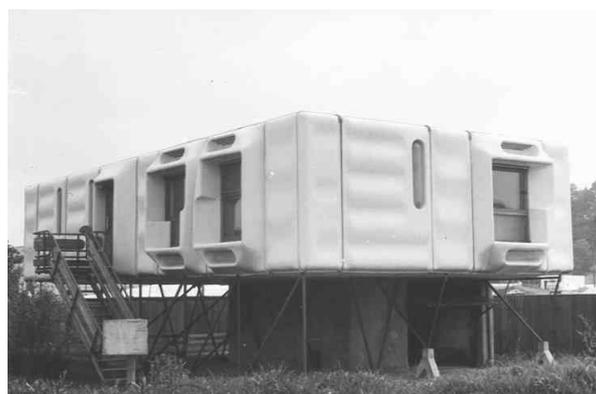
Possiamo considerare l'ornamento anche come espressione di forze costitutive, sia dal punto di vista fisico, alla scala del materiale, che dal punto di vista culturale, diventando una forma di auto-drappeggio, cioè una produzione autonoma di articolazione tra parti, in altri termini l'esito di forze esterne processate da strutture interne.

Nel campo delle tettoniche superficiali, un caso molto particolare ed emblematico è la "Plastic House" di Dieter Schmid, costituita da pattern che permettono al modulo costituente di essere più rigido, aumentandone la performance strutturale.

L'integrazione delle conseguenze morfologiche di determinate scelte tecniche all'interno del discorso architettonico è una soluzione decisamente più elegante rispetto al tentativo di soffocare o negare tali aspetti, nascondendoli.

L'architettura Gotica ne è un esempio.

**2.3.2.** *In basso: Plastic House.  
Dieter Schmid. 1963.*





**2.3.3.** In alto: *Cattedrale di Gloucester.*  
Gloucester, Inghilterra, Regno Unito.

Le caratteristiche estetiche che ne caratterizzano il genere derivano da logiche di questo tipo, superando il concetto di stile architettonico, ma piuttosto una filosofia della bellezza e della creazione caratterizzata dall'altissima risoluzione dei suoi componenti, l'intricchezza e la multiscalarità del dettaglio.

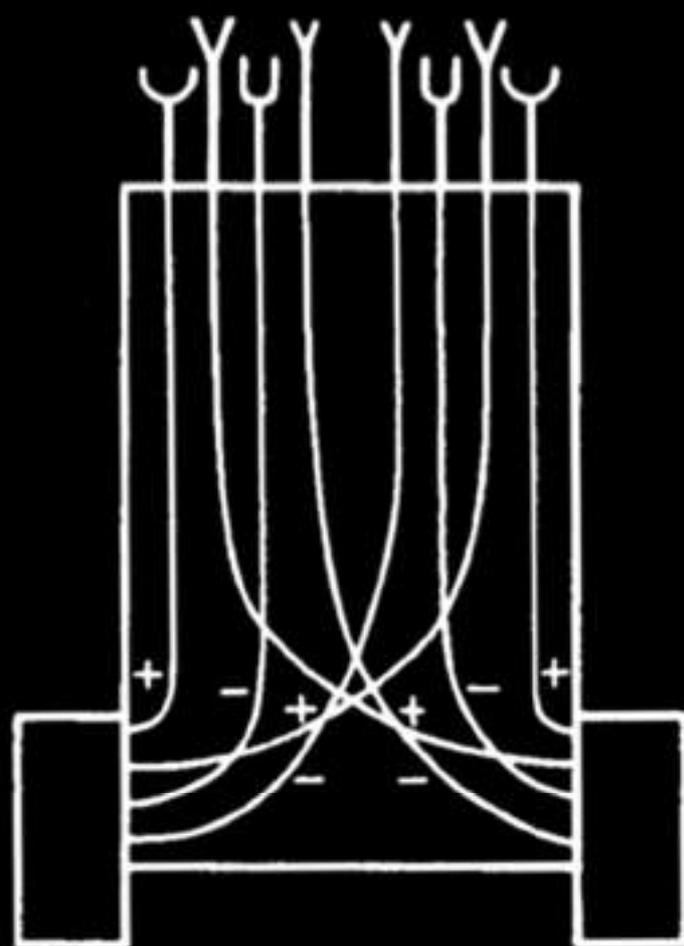
Le tensioni estetiche che si creano fra le parti che compongono gli elementi (basti pensare alle colonne nervate in fasci) raccontano e incanalano le forze in gioco e il rapporto tectonico che hanno con il resto.

Un riferimento emblematico è la cattedrale di Gloucester, dove non c'è separazione tra forma e struttura e tra struttura e ornamento. Lars Spuybroek ha dato un esempio di questo tipo di elementi, osservando infatti le nervature del corridoio della cattedrale di Gloucester, non c'è una chiara distinzione tra le finestre, le pareti e il soffitto, creando una continuità tipica dell'architettura gotica.

Passando invece a riferimenti più attuali, risultano significativi i lavori di Roland Snooks che mettono in relazione fabbricazione robotica, materiali compositi e design algoritmico in modo da comprimere in un'unica struttura superficie ed ornamento. La complessità della forma e l'eccesso di ornamenti rendono i prototipi strutturalmente efficienti, minimizzano la quantità di materiale usato.

**2.3.4.** In basso: sinistra, *RMIT Meeting Pavilion.* destra, *Composite Swarm.*  
Roland Snooks. 2015, 2013.





## 2.4 BACKGROUND TEORICO

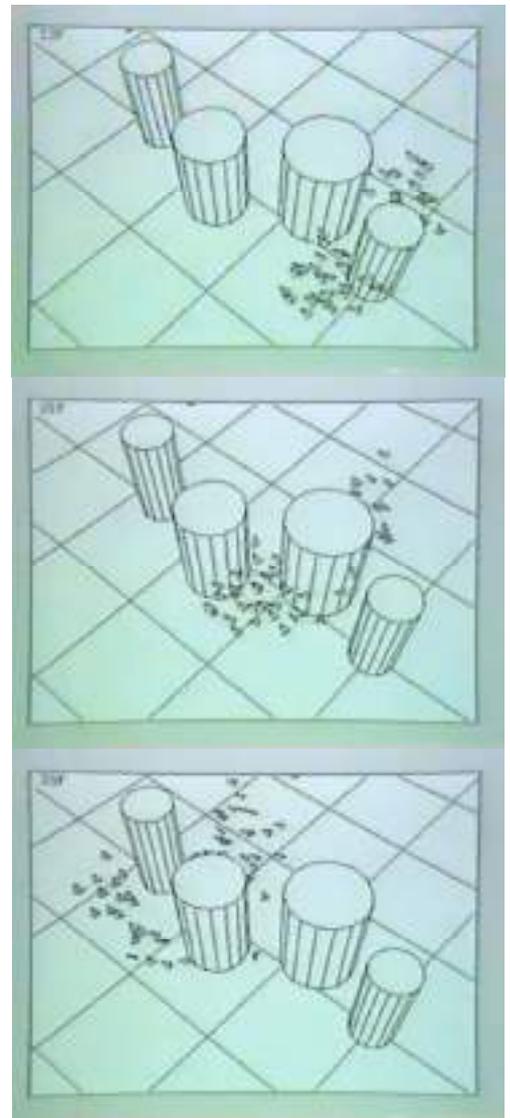
### SIMULAZIONE E ALGORITMO

La simulazione è riferita alla metodologia secondo la quale è possibile costruire dei modelli geometrico-matematici, che mettono in moto delle proprietà materiali, attraverso i quali è possibile arrivare alla generazione ed alla creazione di qualcosa che non è possibile concepire in altro modo. Durante la seconda metà del XX secolo, con l' aumento della consapevolezza degli strumenti che si stavano utilizzando, l' aspetto simulativo della computazione prese piede e la possibilità di incorporare, codificandole, condizioni materiali e logiche di intelligenze distribuite all' interno della fase progettuale ha aperto ulteriori orizzonti.

Oggetto di ricerche da lunga data in intelligenza artificiale, i sistemi multi-agente costituiscono un'interessante tipologia di modellazione di società, e hanno a questo riguardo vasti campi d'applicazione, che si estendono fino alle scienze umane e sociali (economia, sociologia, etc.). Un sistema multi-agente è un insieme di agenti situati in un certo ambiente ed interagenti tra loro mediante una opportuna organizzazione ed uno scambio di feedback con l'ambiente.

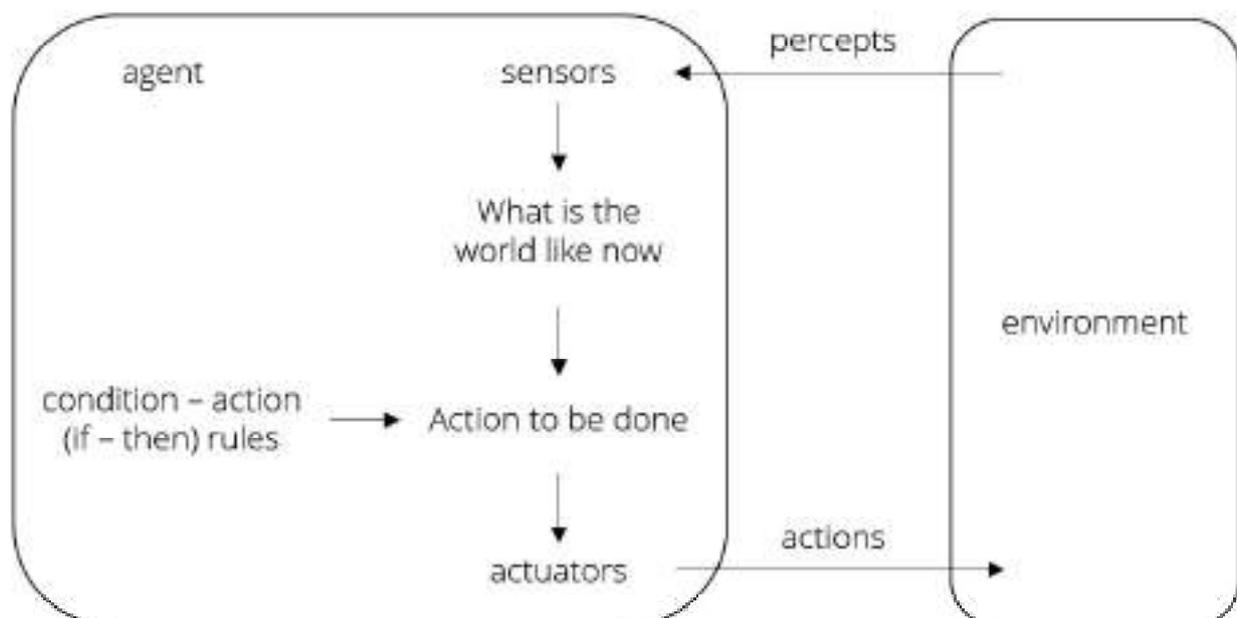
Craig Reynolds, con Boids, simula il comportamento degli stormi di uccelli in volo. Ogni agente del sistema ha una visione limitata e il loro movimento dipende da tre comportamenti di base: separazione (sterzare per evitare di avvicinarsi eccessivamente ai vicini), allineamento (sterzare per allineare 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.

Gli algoritmi generativi che impegnano procedure ricorsive e auto-organizzative sono fondamentali per la generazione di complessità all'interno del design computazionale. Mentre il ruolo degli algoritmi computazionali nell'architettura è diverso, la rilevanza architettonica del design algoritmico dipende dalla capacità di codificare l'intento architettonico all'interno del funzionamento dell'algoritmo.



2.4.2. In alto: Boids.  
Craig Reynolds. 1986.

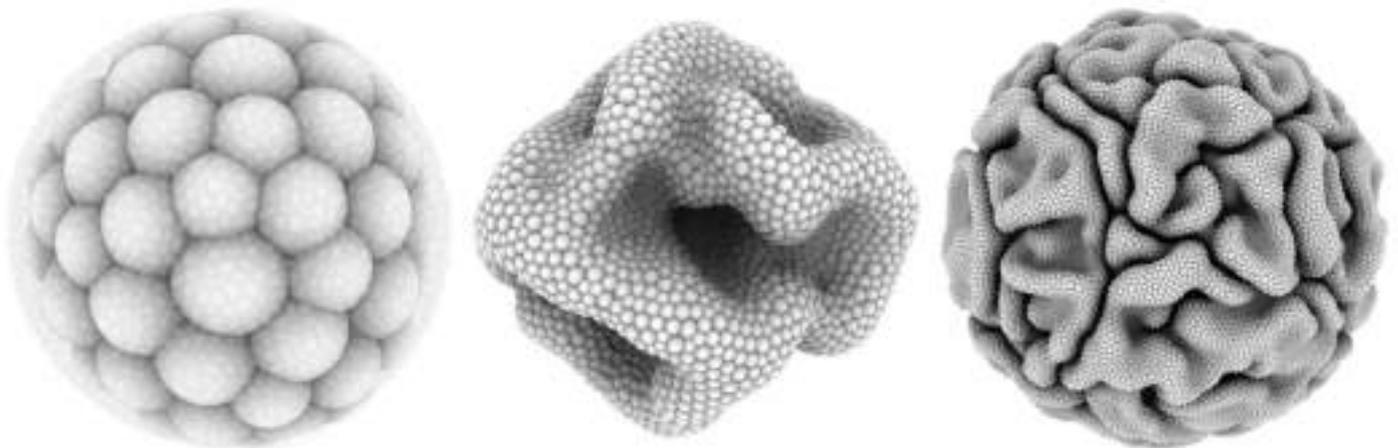
2.4.3. In basso: Multi-agent system feedback loop



Allo stesso modo, l'applicazione di processi algoritmici a elementi discreti come facciate o modelli di superficie limita i sistemi complessi a svolgere un ruolo minore nella definizione dell'architettura, e confina i processi non lineari a un insieme noto di gerarchie architettoniche. Se il design computazionale fornisce la cornice entro cui ripensare l'architettura attraverso un paradigma non lineare, allora non basta semplicemente applicare l'immagine della complessità al corpo della modernità. È forse questa tendenza che contribuisce alla percezione dell'architettura algoritmica come ossessionata da preoccupazioni formali ed estetiche ~ una percezione che è antitetica alla logica organizzativa dei sistemi complessi. Mentre questa logica implica il potenziale per progettare gli aspetti intrinsecamente organizzativi dell'architettura come il programma e la struttura, i sistemi complessi sono altrettanto abili nell'impegnarsi con la forma - poiché l'emergere della forma può essere "inteso come l'organizzazione della materia.

L'emergere di un insieme strano o sconosciuto di caratteristiche richiede la volontà di sperimentare attraverso la progettazione di un algoritmo piuttosto che semplicemente la sua selezione. Gli algoritmi con relazioni altamente indicizzate e stabili con le loro caratteristiche fanno poco per avanzare un processo di design aperto; invece riducono il design algoritmico a un atto di selezione stilistica.

**2.4.4.** *In basso: Cellular forms.*  
*Andy Lomas. 2013.*





## 3.1 DESIGN PROCESS

### STIGMERGY

La forma indiretta di interazione nei sistemi auto-organizzati è più comunemente indicata come “stigmeria”, un concetto introdotto dallo zoologo francese Pierre-Paul Grasse per spiegare il coordinamento e la regolazione dei compiti nel contesto della costruzione di nidi di termiti. Grasse ha ipotizzato che la coordinazione e la regolazione delle attività di costruzione non dipendono dai lavoratori stessi, ma sono principalmente raggiunti dalla struttura del nido. Una configurazione stimolante innesca la risposta di un lavoratore termitaio, trasformando la configurazione in un'altra configurazione che può innescare a sua volta un'altra azione (possibilmente diversa) eseguita dalla stessa termite o da qualsiasi altro lavoratore della colonia.

**3.1.1.** *A lato: vista esterna e sezione trasversale di un nido di termiti risultante dal coordinamento delle attività di costruzione dei lavoratori.*

Da quando è stata proposta da Grasse, la stigmergia è stata applicata per spiegare la costruzione del nido tra molti altri insetti sociali. Mentre le loro rispettive architetture possono differire, i processi formativi di ciascuno seguono la stessa nozione di comunicazione indiretta attraverso la modifica di un ambiente spaziale condiviso. In generale, l'architettura degli insetti coloniali esiste in un ciclo di feedback formato con la popolazione che la occupa. Essa agisce contemporaneamente come una cache di informazioni, registrando il processo decisionale autonomo di ogni individuo che altera localmente la sua configurazione, fornendo informazioni per innescare risposte comportamentali nello stesso gruppo di individui che portano a ulteriori modifiche. In qualsiasi momento durante i processi stigmergici, lo stato attuale del costruito spaziale informa il suo stato futuro.

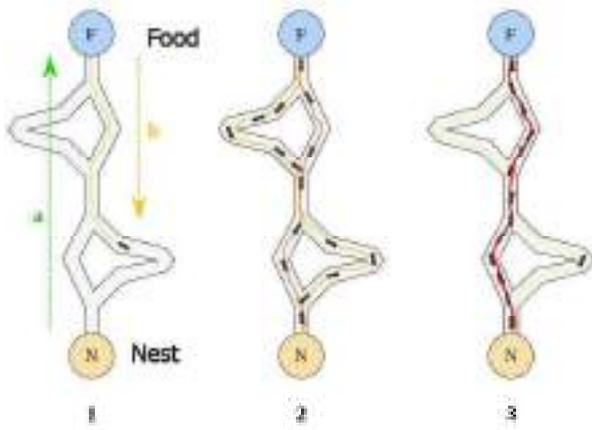
In questo modo il work-in-progress architettonico diventa la fonte delle successive "decisioni di design".



**3.1.2.** In alto: una scia di termiti nella foresta tropicale della provincia di Nakhon Phanom, Thailandia.

**3.1.3.** In basso: termitatio in Australia. Foto di Piotr Gatlik.



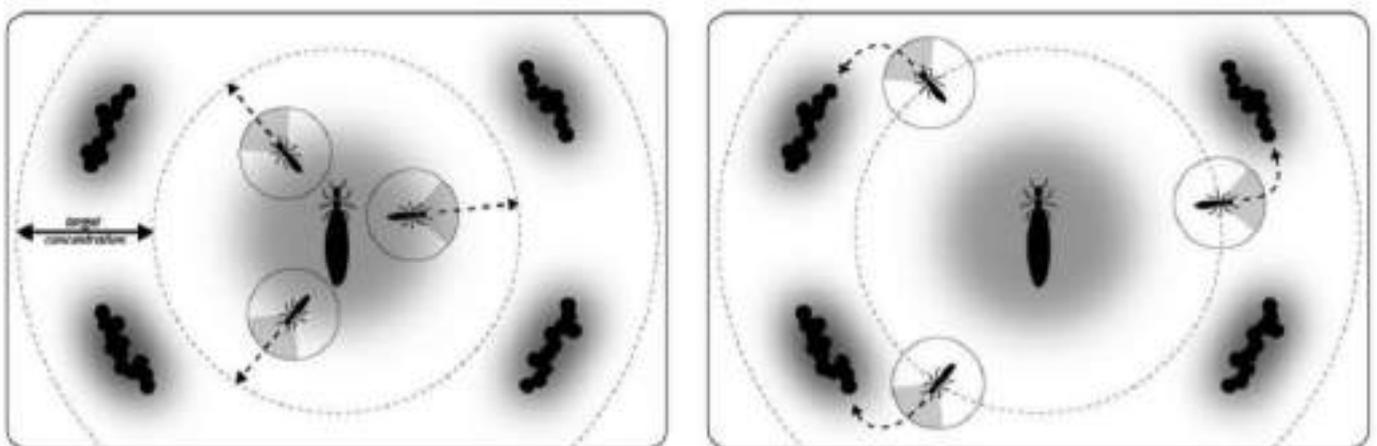


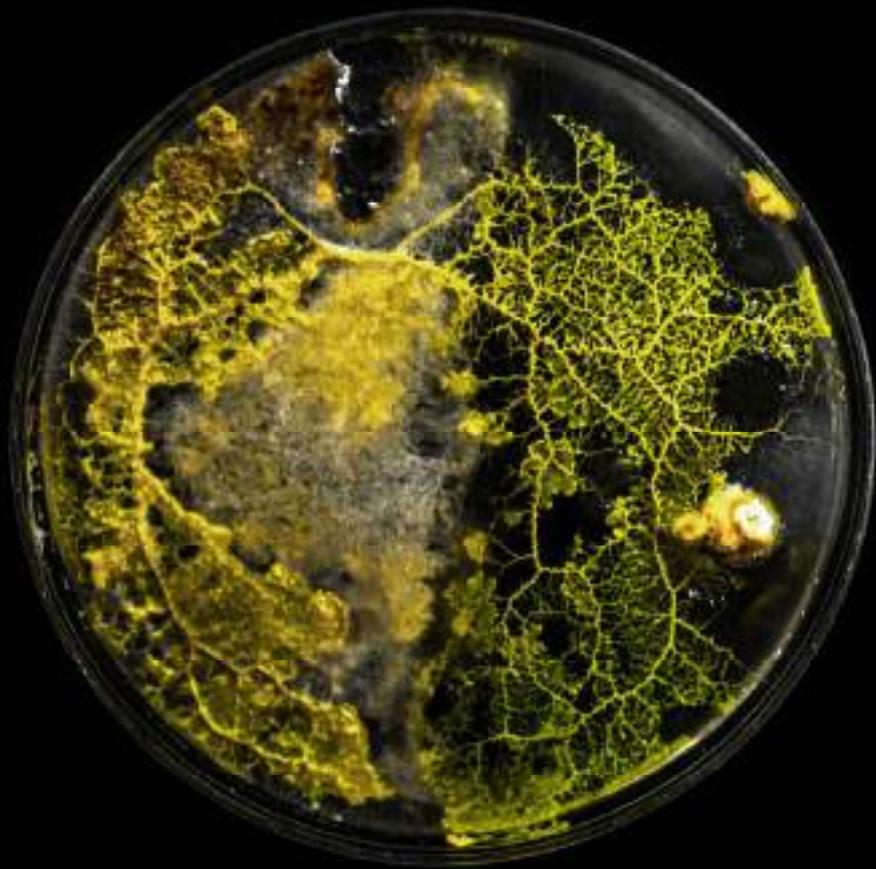
**3.1.4.** In alto: schema che illustra la scelta del percorso più breve da parte della formiche.

Un altro esempio di interazione indiretta in sistemi auto-organizzati è dato dalle formiche, che comunicano le une con le altre lasciando una traccia di feromoni nell'ambiente, quindi una colonia di formiche è un esempio di sistema stigmergico. Guardando più in dettaglio l'uso dei feromoni da parte delle formiche, seguono gradienti locali di concentrazione di feromone che tendono verso regioni a più alta concentrazione mentre depositano ulteriore feromone nella loro scia che le altre formiche possono rilevare. I percorsi ben battuti attraggono più traffico, che rafforza ulteriormente i percorsi, mentre quelli più deboli si diffondono ed evaporano. Per esempio le colonie di formiche costruiscono reti di percorsi efficienti attraverso la deposizione e rilevazione di feromoni.

**3.1.5.** In basso: comportamenti delle termiti durante la costruzione del termitaio. *Stigmergic Space, Dave Reeves. 2013.*

Le termiti hanno un sistema di feromoni leggermente più complesso in quanto la regina emette un feromone primario, che agisce come modello spaziale, e le operaie seguono un gradiente specifico di concentrazione per iniziare a lavorare. Gli operai poi incorporano un feromone secondario nel materiale da costruzione, che agisce come stimolo attrattivo per altri lavoratori. Così, i pilastri e le pareti che emergono come siti di deposito di materiale diventano siti più probabili di ulteriori costruzioni.



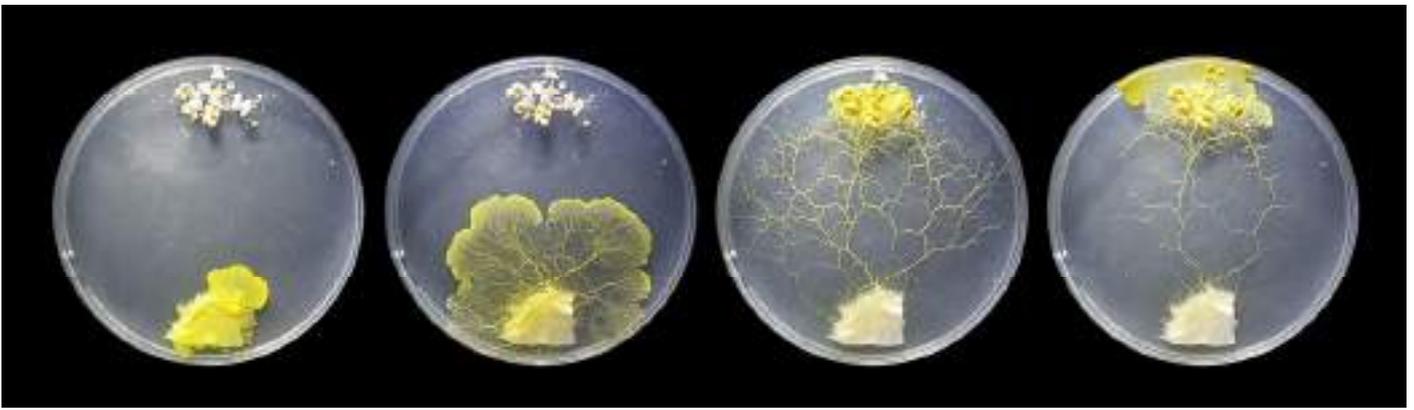


## 3.2 DESIGN PROCESS

### PHYSARUM POLYCEPHALUM

Il *Physarum polycephalum*, spesso definito come melma policefala, è un protista melmoso unicellulare che prospera in ambienti ombreggiati, freschi e umidi, come le foglie in decomposizione e i tronchi.

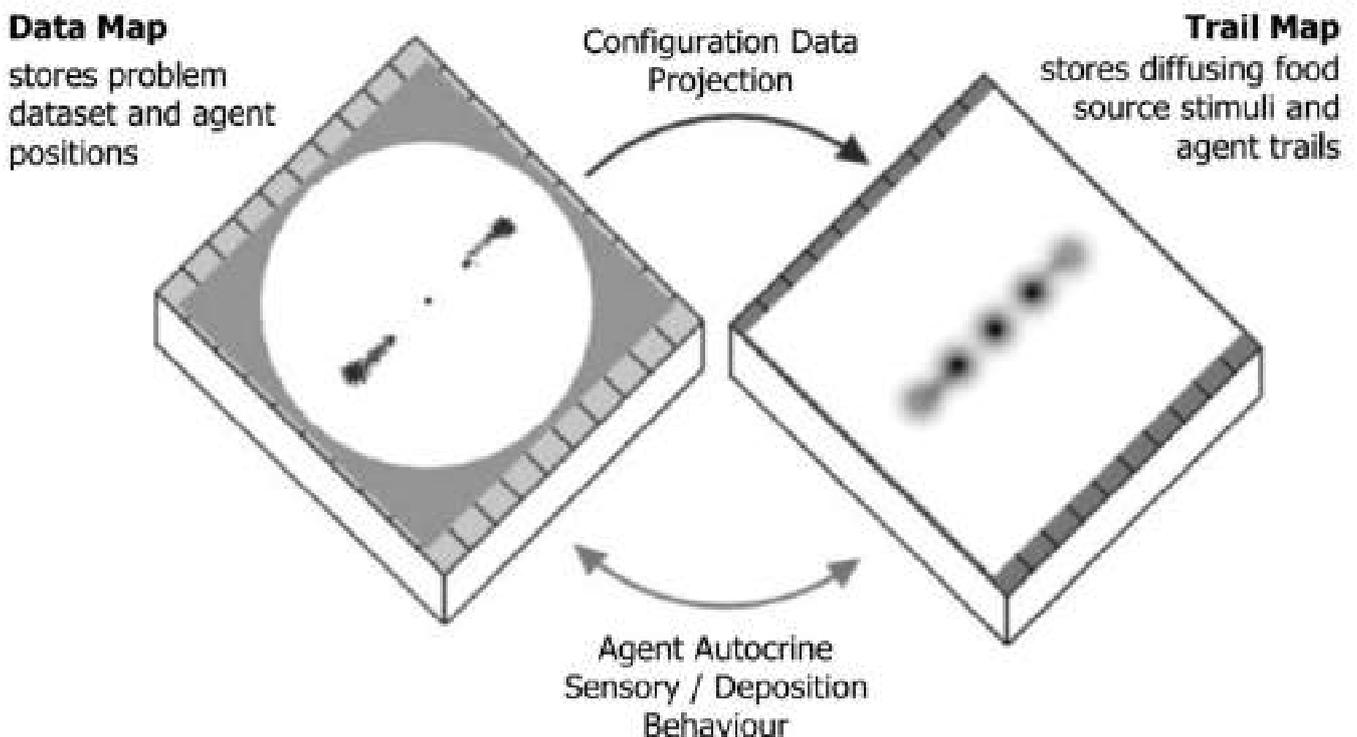
Il *Physarum* eccelle nel comportamento di foraggiamento, vale a dire tutti i metodi con cui un organismo acquisisce e utilizza fonti di energia e nutrienti, attraverso i meccanismi di crescita, movimento e riduzione dell'area. Quando l'organismo può scegliere di viaggiare attraverso due percorsi diversi verso una destinazione, il comportamento emergente gli permette di trovare effettivamente i percorsi più brevi. Questo permette al *Physarum* di navigare nei labirinti, sviluppare sistemi ottimali simili a strade e risolvere altri problemi di ricerca del percorso.

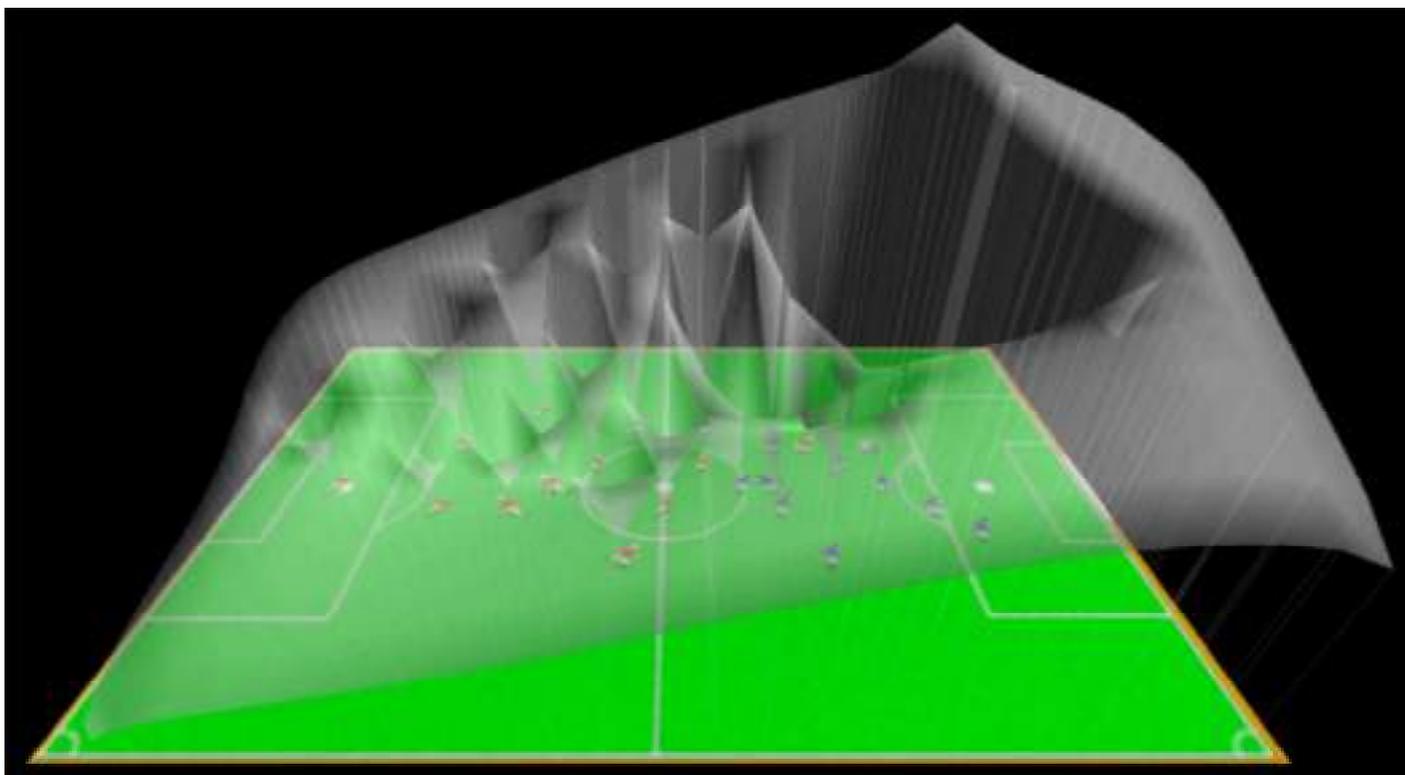


Il modello postulato da Jeff Jones impiega sia una mappa assegnata agli agenti (la mappa dei dati) che una mappa basata sul continuo (la mappa delle tracce). La mappa dei dati è costituita da particelle, mentre la mappa delle tracce da una griglia 2D di valori scalari (simile ad un'immagine basata sui pixel). I dati e la mappa delle tracce si influenzano a vicenda; le particelle della mappa dei dati depositano materiale sulla mappa delle tracce, mentre quelle stesse particelle percepiscono i valori dalla mappa delle tracce per determinare gli aspetti della loro locomozione. Il funzionamento del sistema introdotto è stato un punto di partenza per la definizione delle regole di sviluppo del sistema digitale.

**3.2.2.** *Sopra: Crescita del plasmodio e formazione di venature protoplasmatiche nel Physarum Polycephalum durante il processo di foraggiamento.*

**3.2.3.** *Sotto: Approccio stratificato di mappe accoppiate utilizzate nel modello. Le aree sulla mappa dei dati indicano stimoli di pre-patterning.*  
 J. Jones, 2010 - *Characteristics of Pattern Formation and Evolution in Approximations of Physarum Transport Networks*





**3.2.4.** *Sopra: Collaborative Diffusion: Programming Antiobjects.*  
Alexander Repenning.

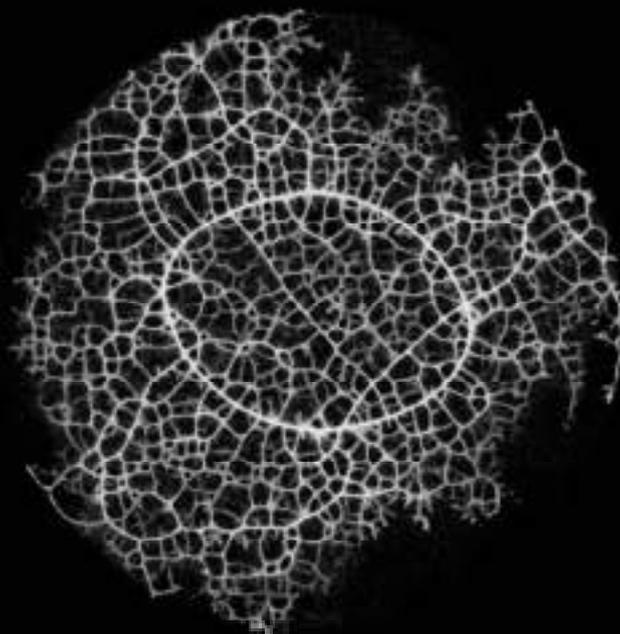
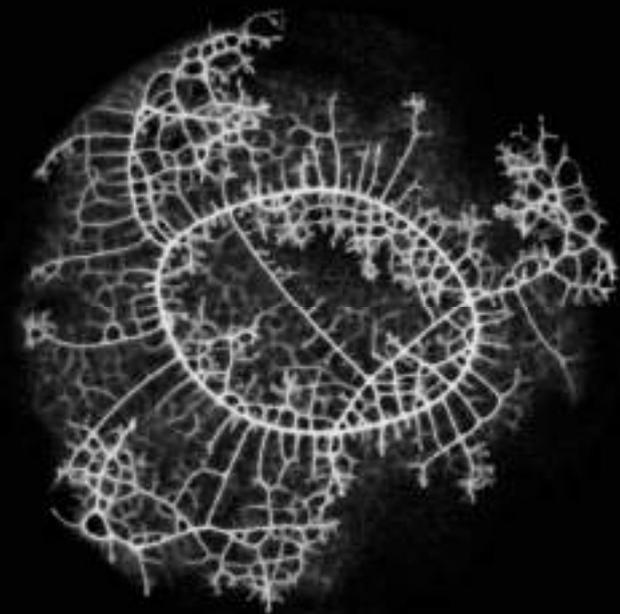
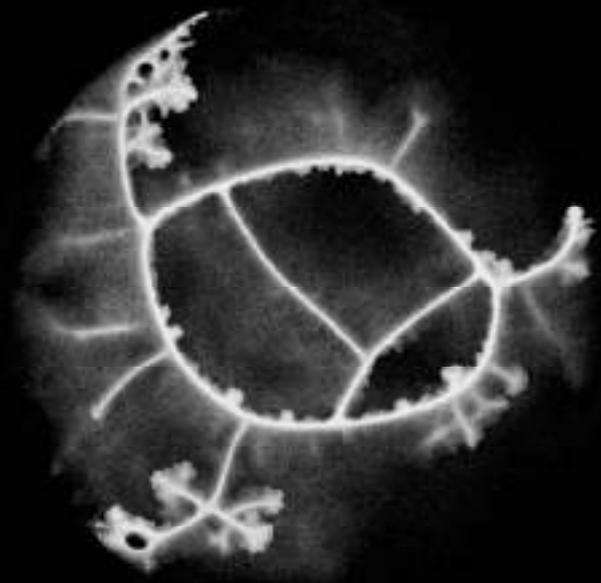
Il modello appena descritto ricalca il meccanismo dell' antioggetto.

Seguendo una programmazione orientata agli oggetti, molto spesso ci sentiamo sicuri di progettare e implementare anche i sistemi più complessi. Tuttavia, la metafora degli oggetti può spingersi troppo oltre facendoci creare oggetti che si ispirano troppo al mondo reale.

Ecco che il sistema che ne risulta può essere molto più complesso di quanto dovrebbe essere, o peggio, non funzionerà affatto. Ecco che la nozione di antioggetto viene postulata da Alexander Repenning come una sorta di oggetto che sembra fare essenzialmente l'opposto di quello che generalmente pensiamo l'oggetto dovrebbe fare.

Nello spirito dell'antioggetto, Collaborative Diffusion è un algoritmo che scambia i ruoli computazionali in primo piano (attivi) con quelli di sfondo (passivi).

L'IA tradizionale munisce gli agenti di intelligenza computazionale, "Collaborative Diffusion" invece mette quello che è tradizionalmente considerato lo sfondo, in primo piano computazionale.



## 3.3 DESIGN PROCESS

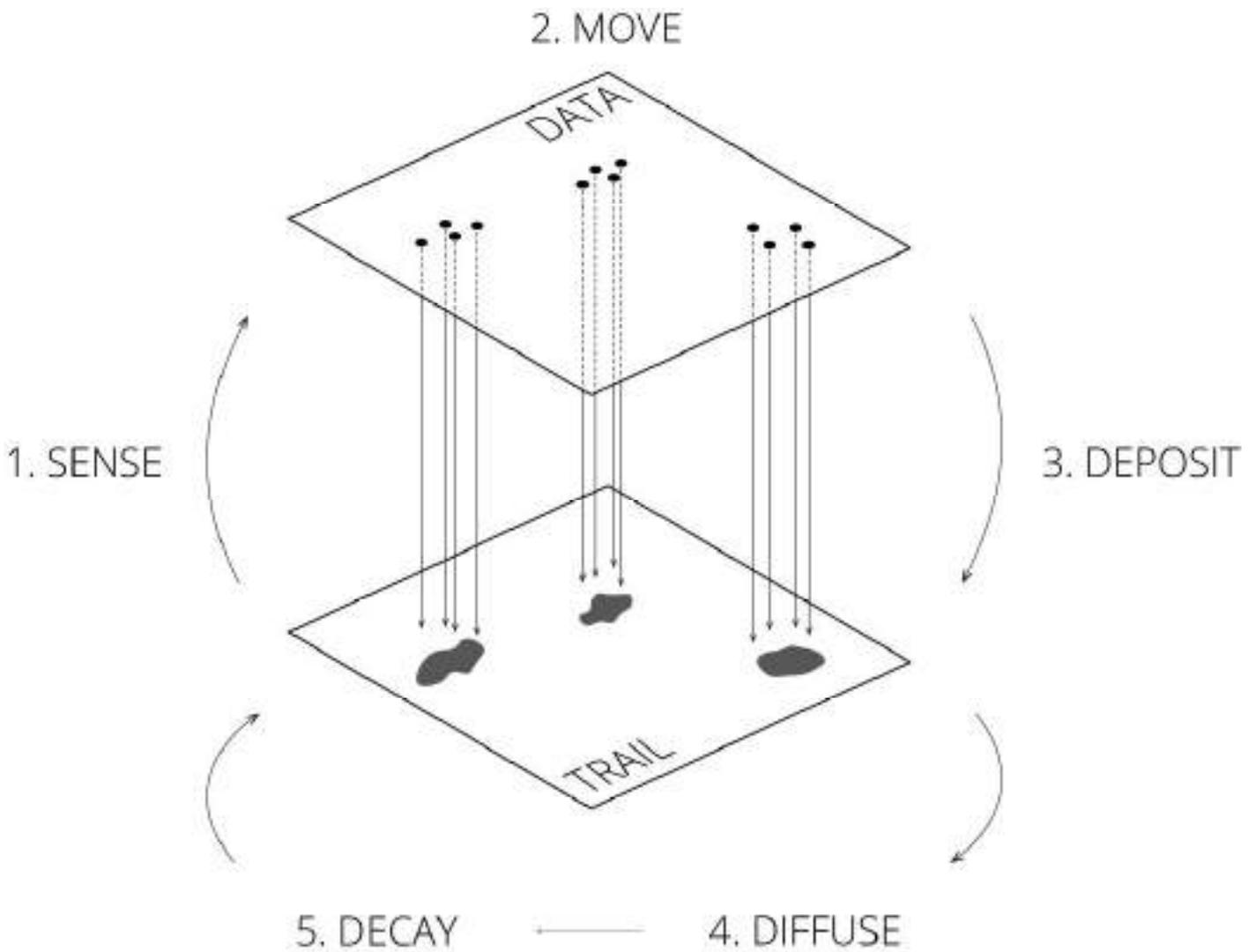
### SISTEMA DIGITALE

Il *Physarum polycephalum*, spesso definito come melma policefala, è un protista melmoso unicellulare che prospera in ambienti ombreggiati, freschi e umidi, come le foglie in decomposizione e i tronchi.

Il *Physarum* eccelle nel comportamento di foraggiamento, vale a dire tutti i metodi con cui un organismo acquisisce e utilizza fonti di energia e nutrienti, attraverso i meccanismi di crescita, movimento e riduzione dell'area. Quando l'organismo può scegliere di viaggiare attraverso due percorsi diversi verso una destinazione, il comportamento emergente gli permette di trovare effettivamente i percorsi più brevi. Questo permette al *Physarum* di navigare nei labirinti, sviluppare sistemi ottimali simili a strade e risolvere altri problemi di ricerca del percorso.

**3.3.1.** *A lato: simulazione del Physarum Polycephalum durante la sua fase vegetativa.*

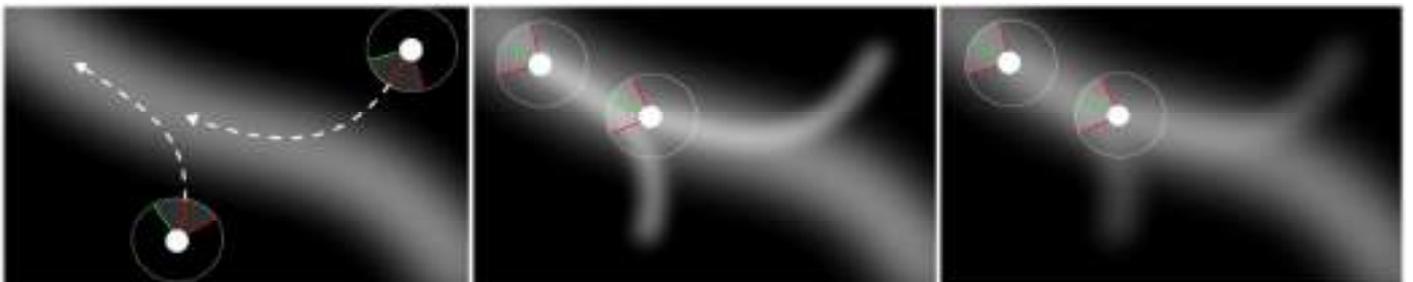
*Sage Jenson, 2019*



Il modello utilizza un approccio multi-agente per costruire reti di trasporto dinamiche bottom-up. La comunicazione tra gli agenti avviene attraverso il rilascio di tracce di chemoattrattore nell'ambiente. La popolazione, attratta dalle tracce sparse nell'ambiente, le segue, rilasciandone a sua volta. La conseguente diffusione ed evaporazione del chemoattrattore nell'ambiente permette di catalizzare il rilascio di chemoattrattore solo sui percorsi più utilizzati, che sono anche i percorsi più brevi.

**3.3.2.** *Sopra: feedback loop del sistema multi-agente*

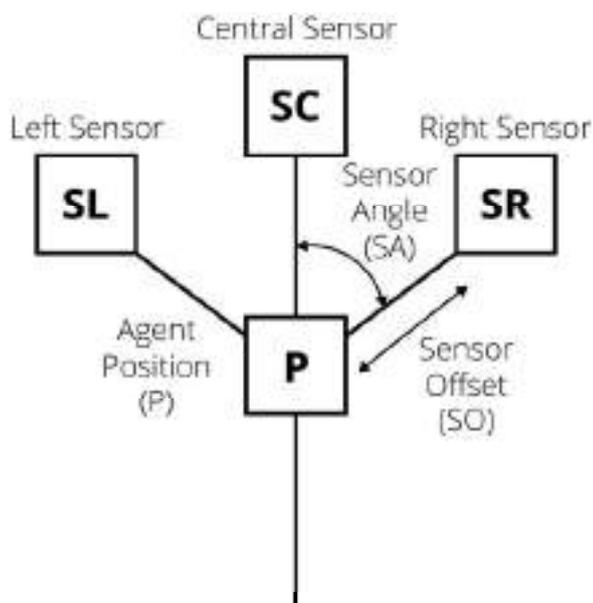
**3.3.3.** *Sotto: Comportamenti del sistema multi-agente*



*L'agente si muove verso la più alta concentrazione di chemoattrattore*

*L'agente deposita una quantità di chemoattrattore sulla nuova posizione*

*Il chemoattrattore si diffonde ed evapora nell'ambiente*



3.3.4. Sopra: proprietà dell' agente

Il "corpo" dell' agente occupa una singola cella in un reticolo discreto e ogni cella corrisponde ad un valore digitalizzato in scala di grigi (valori scalari da 0 ad 1). I valori della scala di grigio corrispondono all'habitat ambientale della popolazione (livelli di grigio specifici rappresentano lo spazio vuoto, i confini, le fonti di cibo).

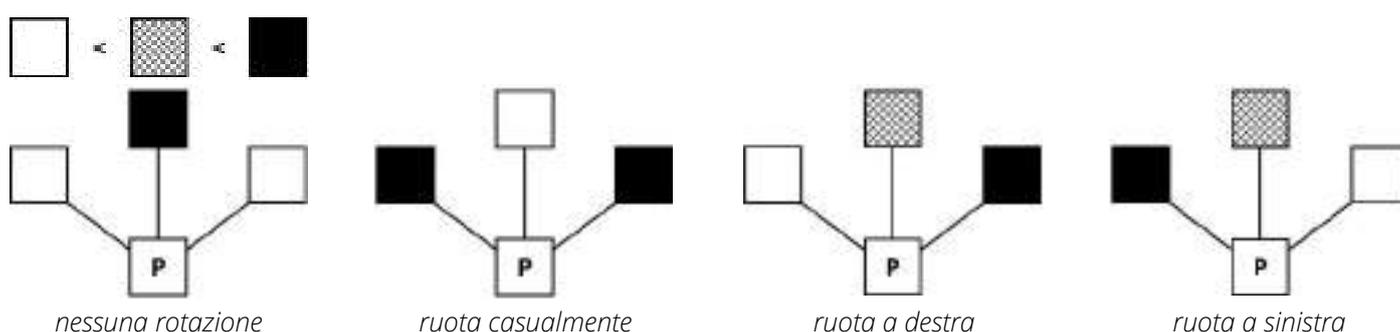
La particella ha tre sensori che campionano i valori ambientali ad una certa distanza (distanza di offset del sensore SO) dalla particella.

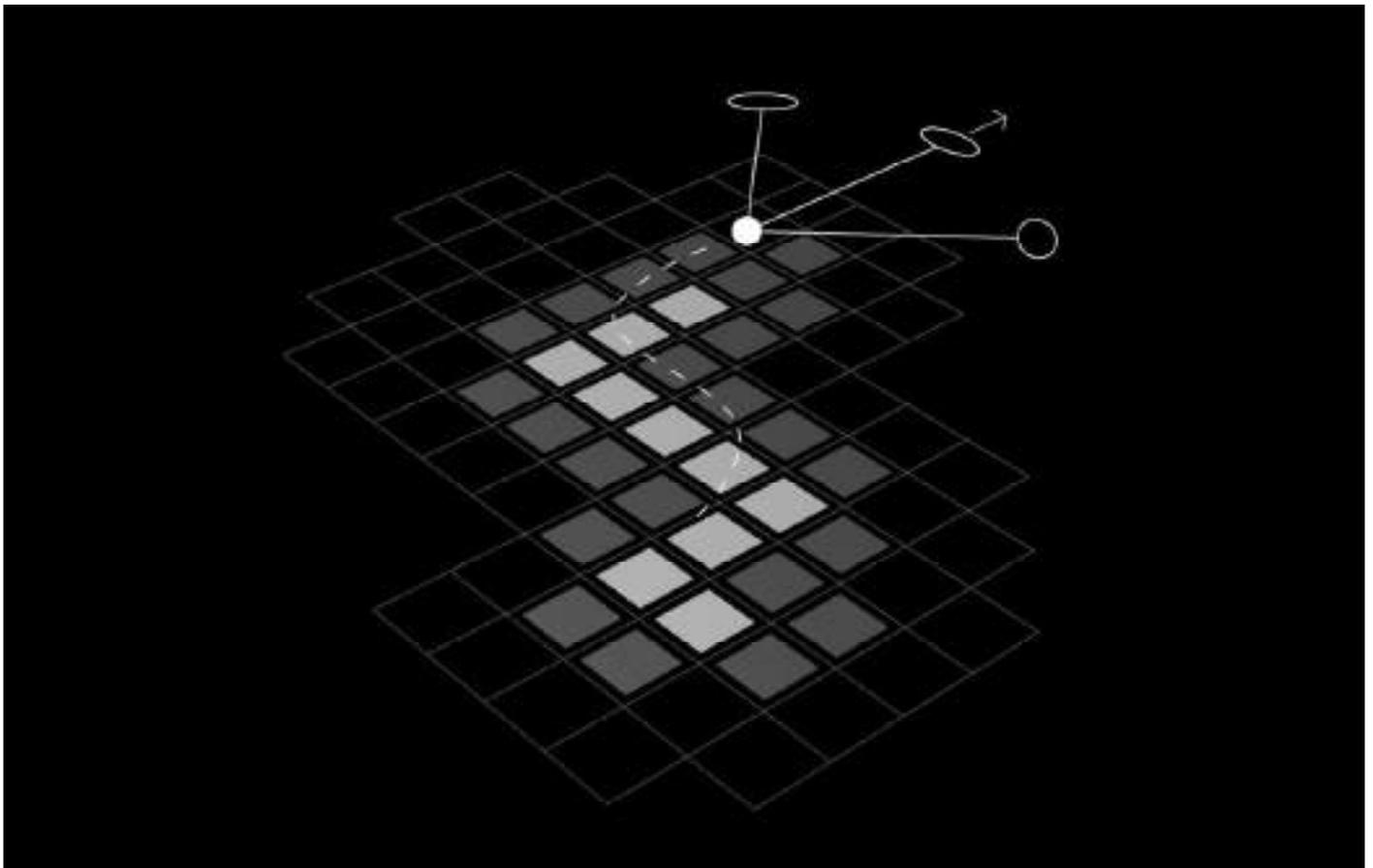
Questa morfologia di offset dei sensori genera un significativo accoppiamento sensoriale locale tra la popolazione di particelle (l'input sensoriale di una particella può essere influenzato dalle azioni di una particella vicina). La coesione di questa "folla" aggregata è assicurata dal fatto che esiste un'attrazione reciproca per gli stimoli depositati dalla popolazione di particelle.

La popolazione adotta un comportamento di chemiotassi autocrina (il che significa che le particelle secernono e percepiscono approssimazioni dello stesso chemoattrattore, quindi le azioni delle particelle possono anche influenzare il loro comportamento). Una semplificazione significativa rispetto all'organismo reale è che sia le fonti di cibo che i cambiamenti nel flusso del protoplasma interno sono rappresentati dalla diffusione della stessa sostanza chemoattrattiva.

Nella fase sensoriale dell' algoritmo, le particelle percepiscono la concentrazione di stimoli da tre sensori orientati in avanti. Ad ogni iterazione della simulazione le particelle si orientano verso la fonte chemoattrattiva più forte ruotando a sinistra o destra, a seconda della fonte degli stimoli. Si noti che il comportamento delle particelle è molto semplice ed è esplicitamente orientato in avanti

3.3.5. Sotto: regole di locomozione





**3.3.6.** *Sopra: interazione agente-ambiente*

**3.3.7.** *A lato: Formazioni spontanee ed evoluzione della rete di trasporti variando il numero della popolazione*

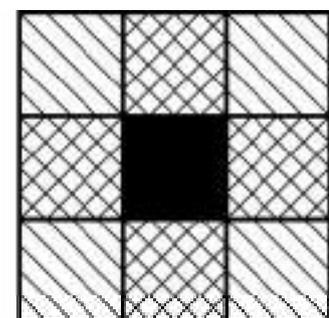
## AMBIENTE

Il paesaggio dell'ambiente abitabile degli agenti è specificato da una mesh, i cui vertici possono essere caratterizzati da un determinato valore scalare, che rappresenta la quantità di chemoattrattore in quel punto specifico.

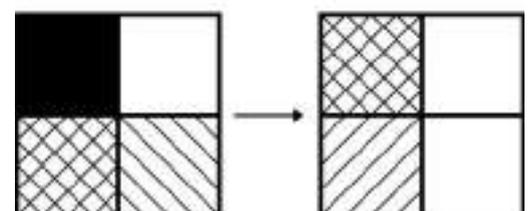
Viene utilizzato un approccio a livelli: Oltre al livello del paesaggio di dati, dove è memorizzata la configurazione dell'ambiente, possono essere utilizzate altre strutture dati, di dimensioni identiche e corrispondenti al sistema di coordinate dello strato di dati. Questi strati separati sono usati per memorizzare gli stimoli chemiotattici che gli agenti depositano e seguono (lo strato delle tracce).

L'ambiente incorpora un comportamento di diffusione, che permette ad ogni valore scalare immagazzinato negli slot dell'ambiente di diffondersi per le celle vicine ed un comportamento di evaporazione, che permette l'incrementale erosione del valore di chemoattrazione ad ogni iterazione.

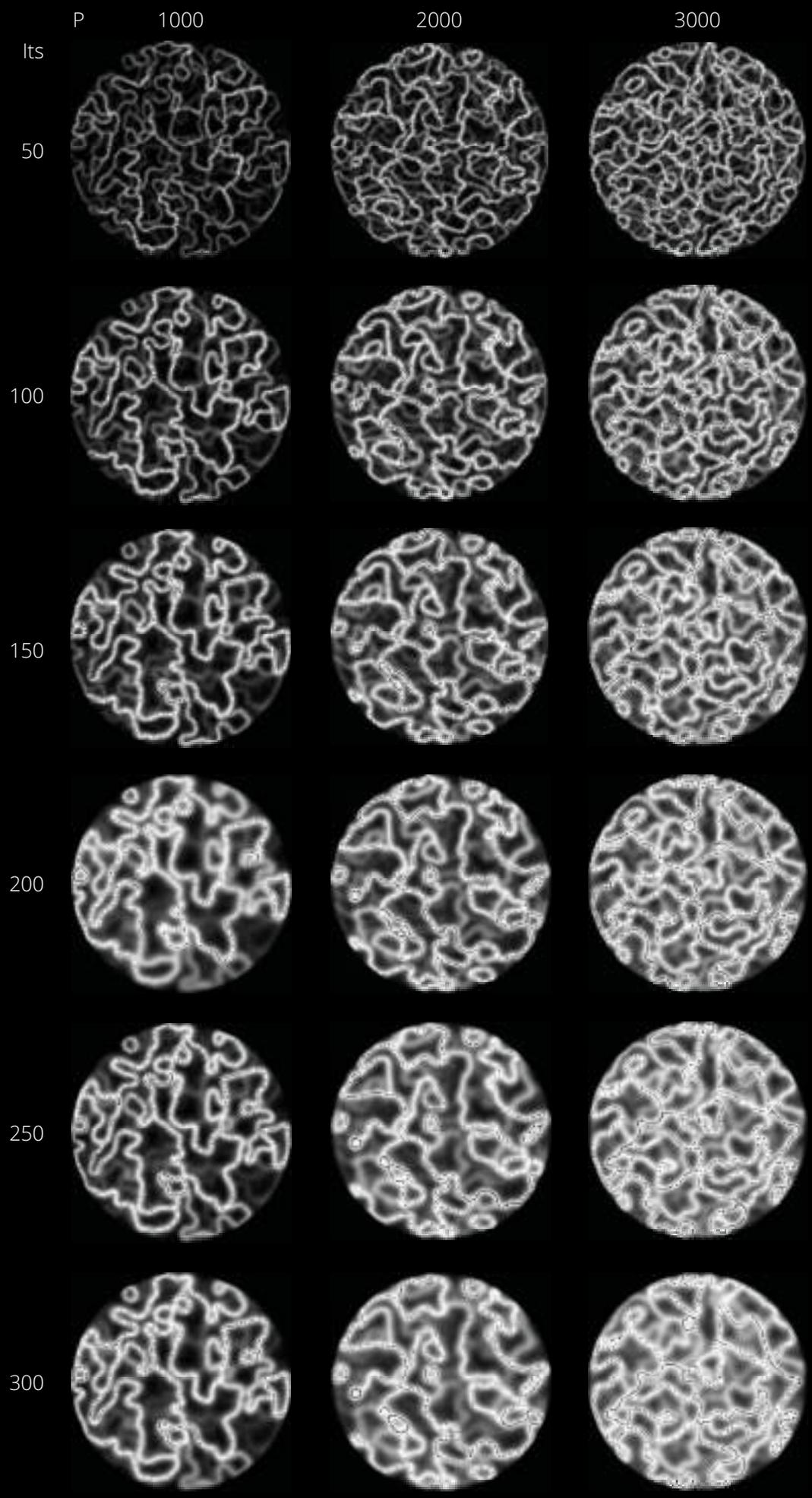
**3.3.8.** *Sotto: comportamento di diffusione ed evaporazione*

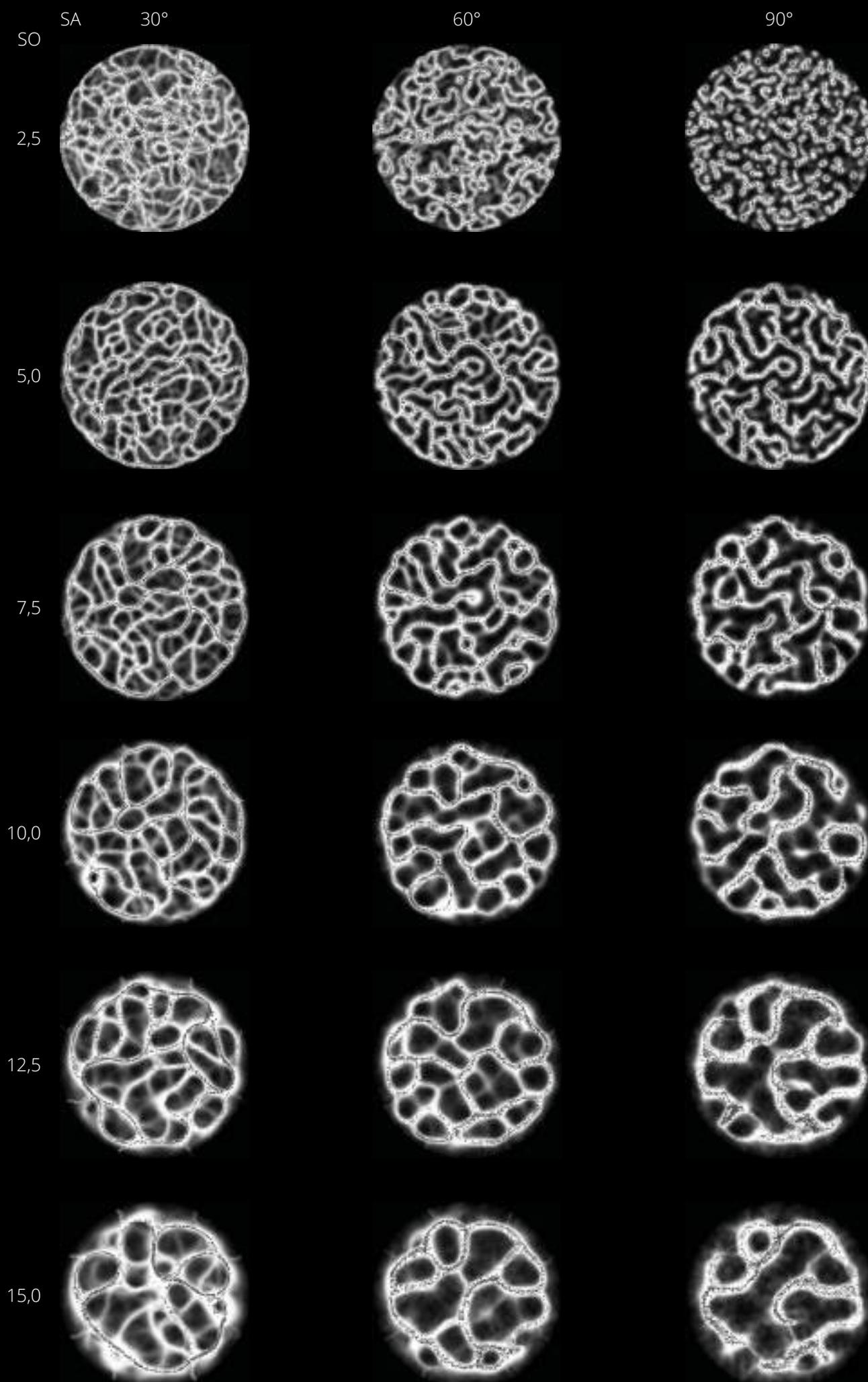


*diffusione*

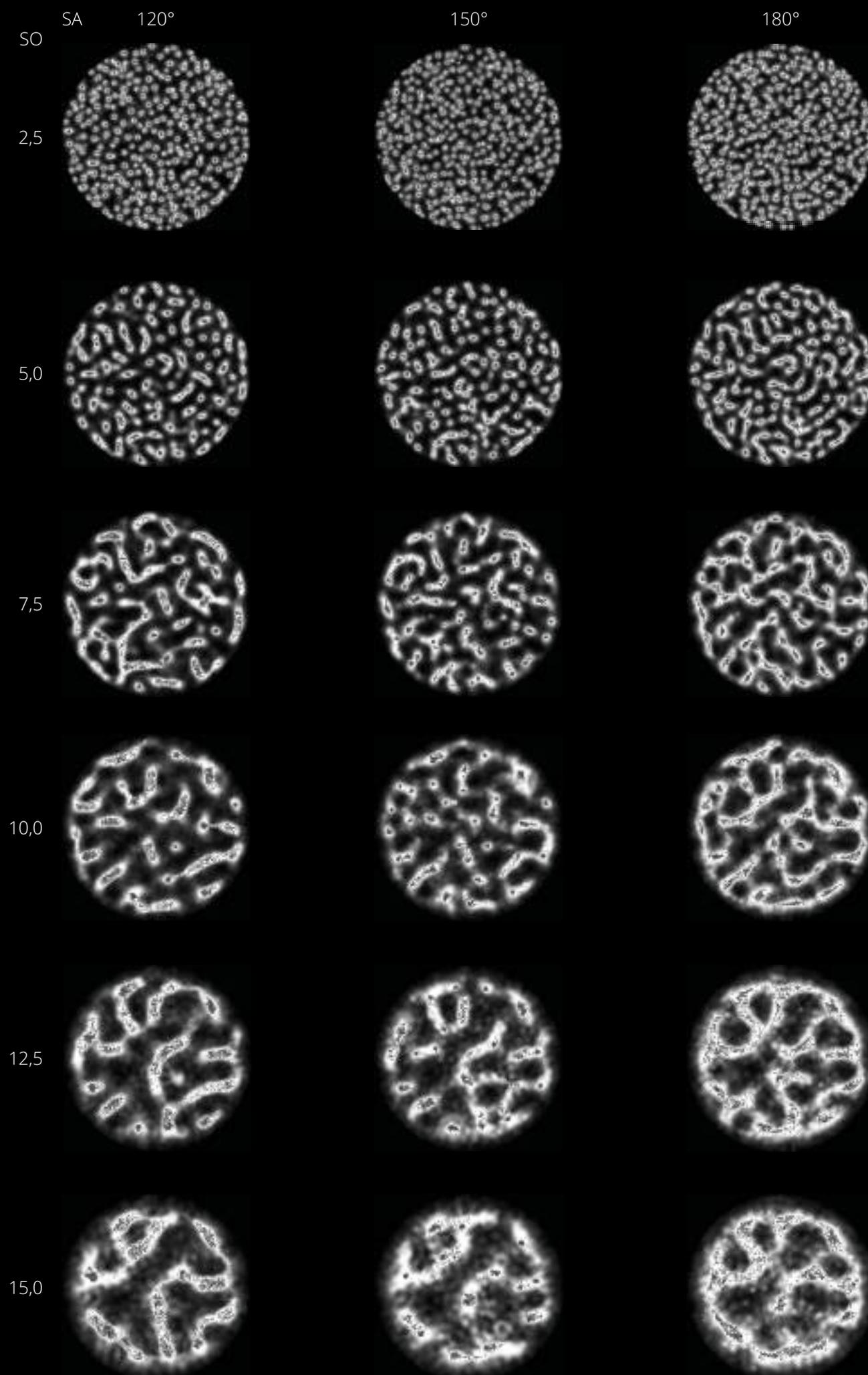


*evaporazione*





**3.3.9.** Test effettuati variando angolo ed offset del sensore.

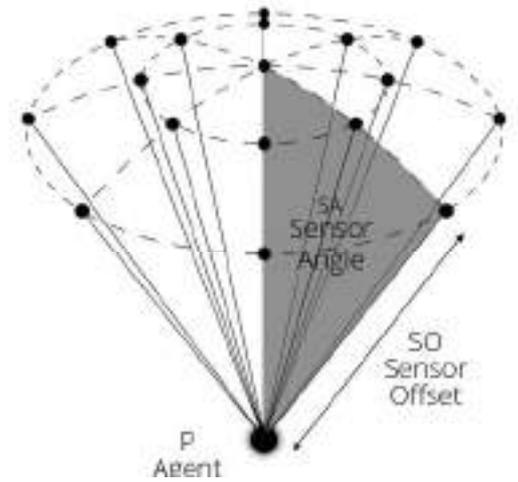


# MODELLO 3D

Nello spazio tridimensionale, il "corpo" dell'agente occupa un singolo voxel dell'ambiente, costituito da una griglia  $R_xR_yR_z$ .

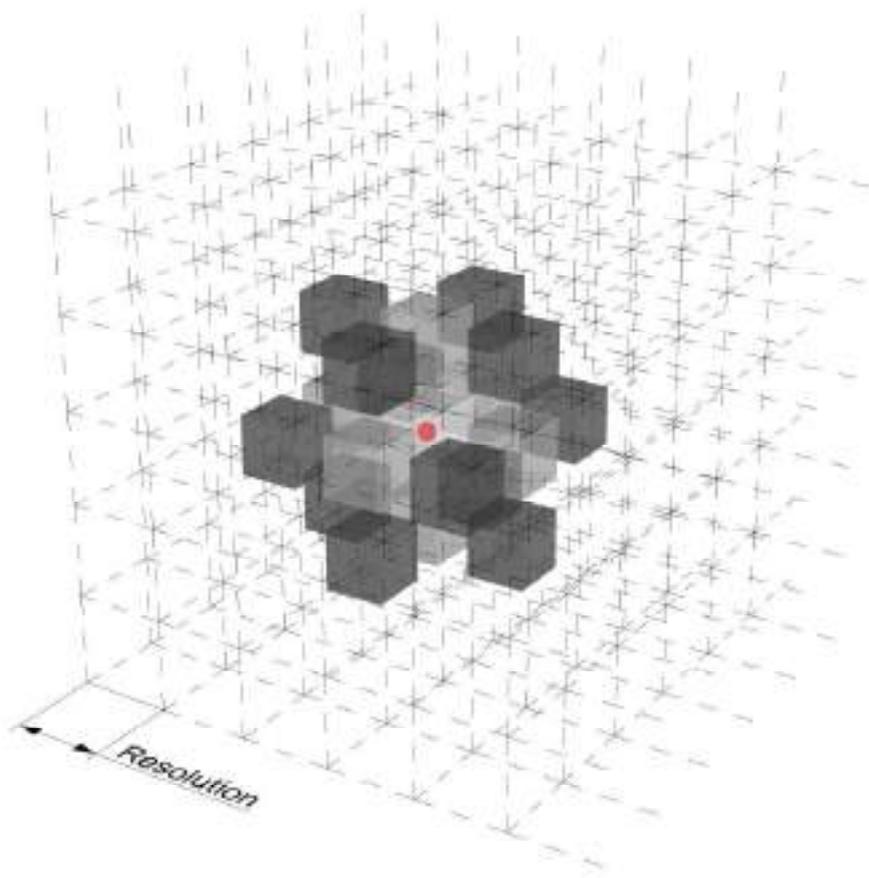
L'agente ha diciassette sensori che campionano i valori ambientali ad una certa distanza (distanza di offset del sensore  $SO$ ) dalla sua posizione. La traslazione da ambiente bidimensionale a tridimensionale, trasforma i sensori da una porzione visiva triangolare ad un cono visivo, la cui apertura è regolabile attraverso l'angolo del sensore.

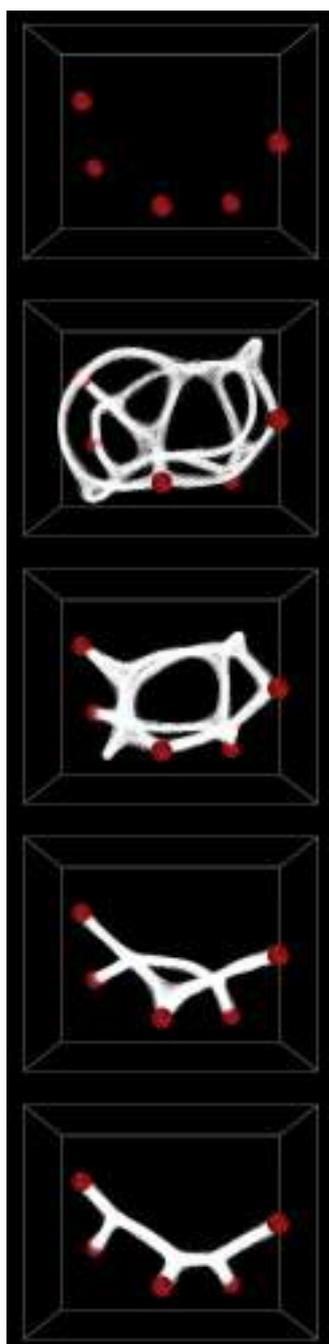
Il paesaggio dell'ambiente abitabile degli agenti è specificato da una griglia di voxel, i cui centri possono essere caratterizzati da un determinato valore scalare, che rappresenta la quantità di chemoattrattore in quel punto specifico.



3.3.10. Sopra: proprietà dell'agente

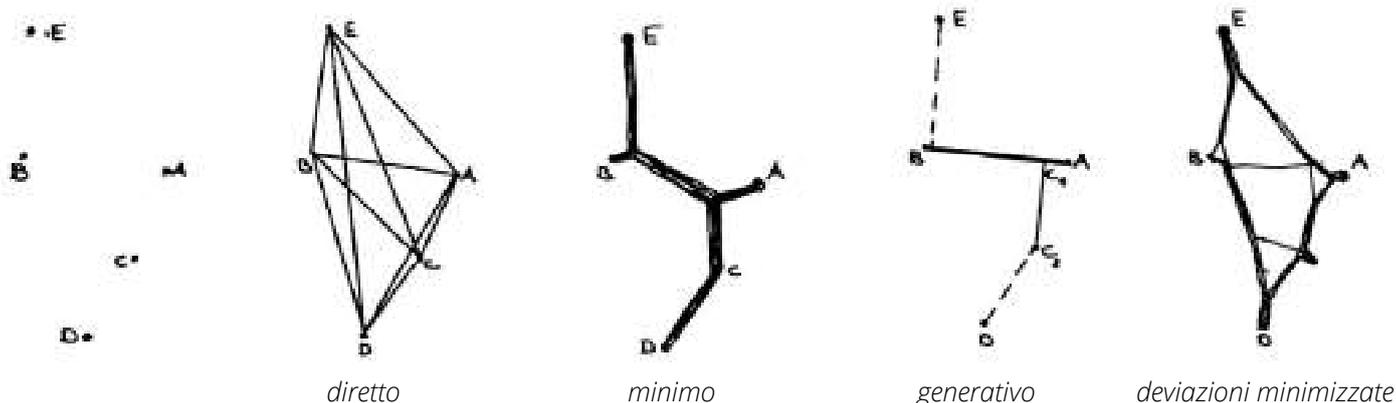
3.3.11. Sotto: interazione agente-ambiente





3.3.12 Sopra: evoluzione della rete

3.3.13 Sotto: sistemi di percorso - Frei Otto

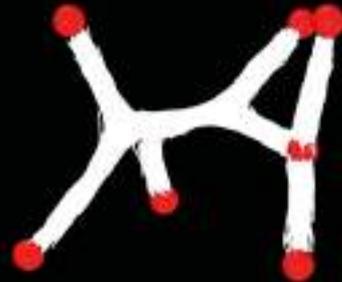
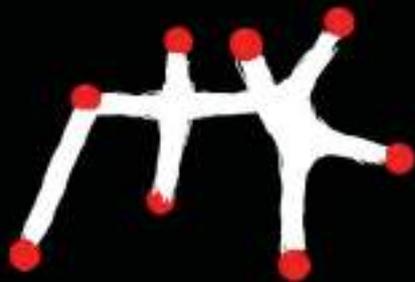


Poiché è possibile generare modelli complessi senza stimoli preesistenti, il ruolo degli stimoli pre-patterning dovrebbe essere quello di guidare o modificare, in qualche modo, il processo di formazione del modello sottostante.

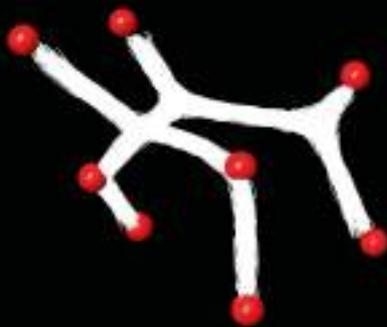
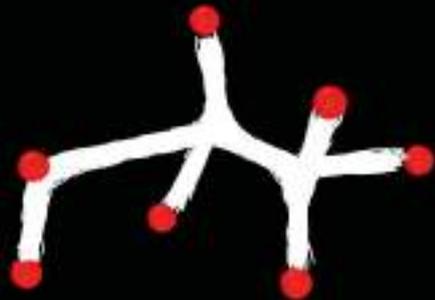
Gli stimoli preesistenti sono rappresentati da fonti di chemoattrattore. La forza dello stimolo è legata all'intensità del valore di chemoattrazione e può essere modificata specificando un fattore di ponderazione (valore dello stimolo  $\times$  peso) dove il peso è tipicamente compreso tra 0,01 e 1 (a seconda dell'area della sorgente dello stimolo). Gli stimoli sono soggetti allo stesso processo di diffusione che si applica alla sostanza chimica prodotta dall'agente.

Quando uno stimolo viene inizializzato con una piccola dimensione della popolazione, la rete emerge inizialmente in modo molto simile a quella senza stimoli pre-patterning.

Usando questi punti come un'ancora, la rete si evolve fino a quando i percorsi ridondanti vengono rimossi. Quando il numero di fonti di stimolo aumenta, l'evoluzione della rete mostra un comportamento di minimizzazione caratteristico dei sistemi a percorso minimo di Frei Otto (per un dato insieme di punti, il sistema di percorso minimo rappresenta la quantità più breve di materiale di collegamento quando tutti i punti sono collegati). L'evoluzione della rete sotto l'influenza di stimoli pre-patterning sembra esibire effetti quasi-fisici di tensione superficiale. Questo è un fenomeno emergente, che non è chiaramente specificato dall'algoritmo della particella. Gli effetti di tensione superficiale assomigliano a quelli visti nelle pellicole di sapone di Frei Otto (i percorsi di incontro si collegano preferibilmente a nodi a tre vie e con angoli di 120 gradi). Il sistema a percorso minimo finale si forma quando i percorsi di rete ridondanti sono eliminati e chiusi dagli effetti emergenti di tensione superficiale.

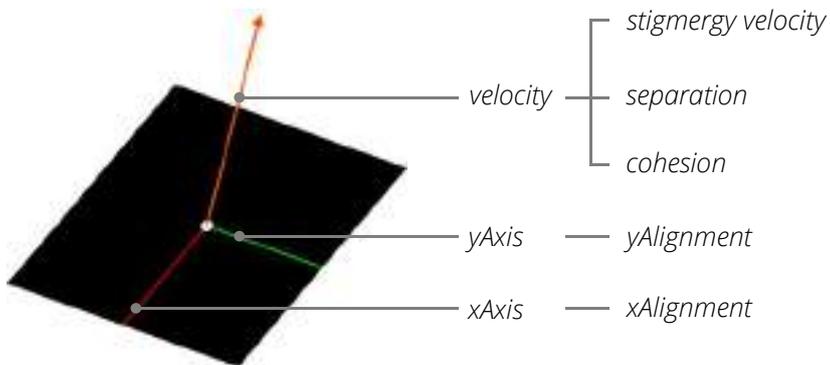
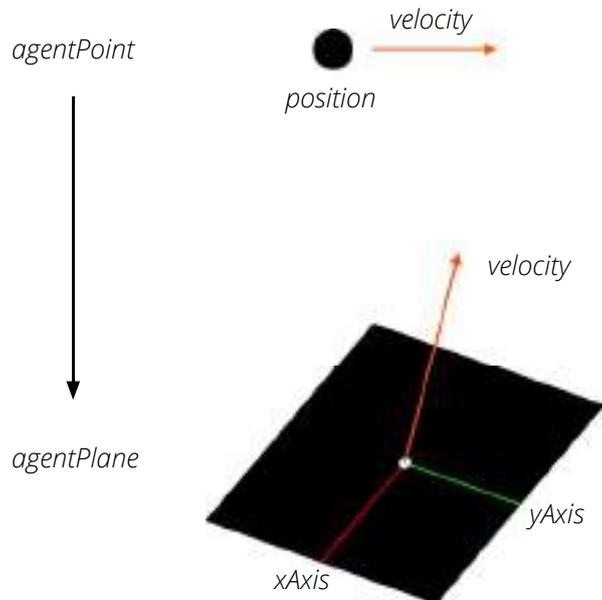


3.3.14 test effettuati variando la posizione dei chemoattrattori



# AGENTPLANE

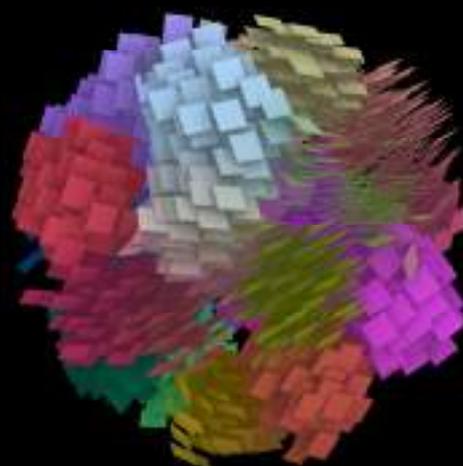
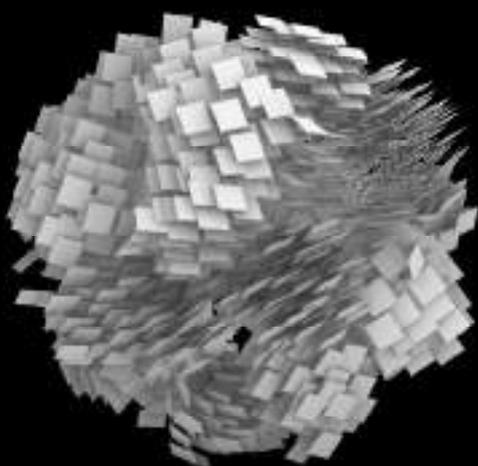
Ne segue uno studio di come le proprietà multi-agente possano essere incorporate in un livello di geometria più alto e, per non limitare la figura dell' agente ad un punto ed alle sue tracce, sono stati introdotti dei piani all' interno del sistema. Per permettere un cambio di livello da traiettoria a superfici, o più semplicemente per orientare delle geometrie su queste traiettorie, è necessario introdurre nel sistema un piano che ne determini l' orientamento nello spazio tridimensionale.



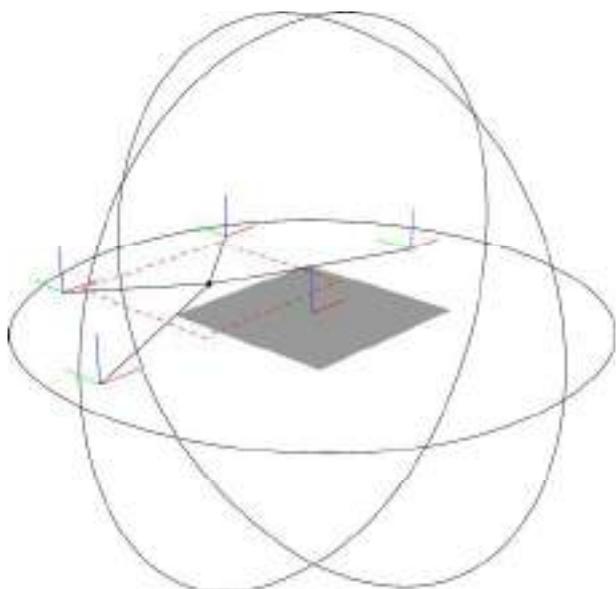
**3.3.15** *Sopra: passaggio da agntPoint a agentPlane*

**3.3.16** *Al lato: comportamenti dell' agentPlane*

**3.3.17** *Sotto: sistema di agentPlane con relativo orientamento nello spazio*

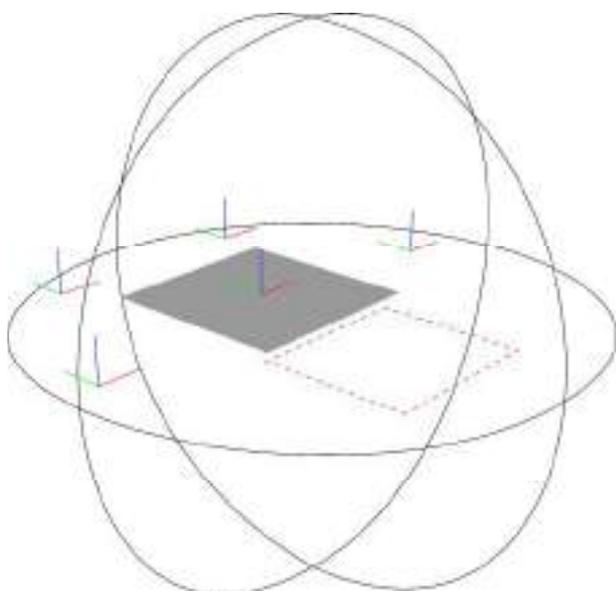


## COESIONE



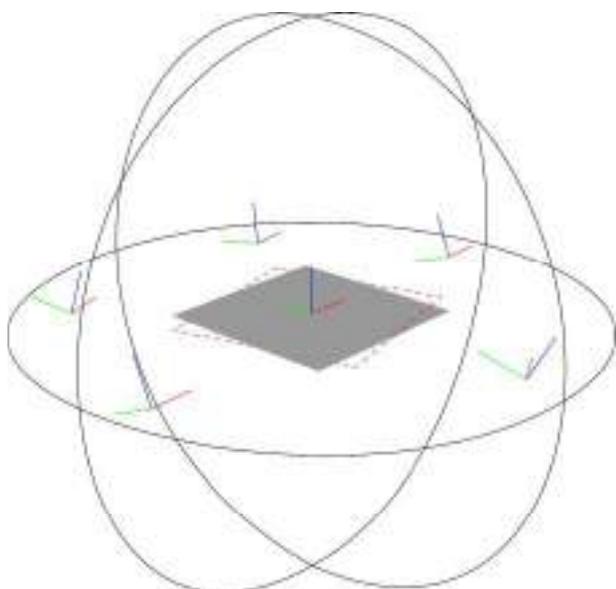
Ogni agente entro una soglia sferica di prossimità analizza, se esistono, agenti interni a tale contorno e calcola il vettore relativo alla somma vettoriale dei vettori che individuano le loro posizioni. In tal modo viene calcolato il vettore che, applicato al piano di riferimento, tende a portare il piano verso il baricentro dei piani vicini.

## SEPARAZIONE



Ogni agente entro una soglia sferica di prossimità analizza, se esistono, agenti interni a tale contorno e calcola il vettore opposto alla somma vettoriale dei vettori che individuano le loro posizioni. In tal modo vengono evitate compenetrazioni locali tra gli intorni di prossimità associati agli agenti. La formazione risultante dall'interazione tra gli agenti risulta quindi geometricamente coerente con la spazialità di cui ogni agente è dotato e consente simultaneamente l'espressione di altri comportamenti senza compenetrazioni materiche.

## ALLINEAMENTO



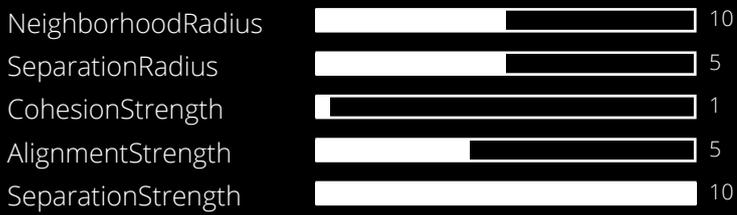
L'allineamento, come definito dal modello Boids di C.Reynolds (1986) viene descritto come la tendenza ad orientare la direzione propria lungo il vettore medio risultante di un insieme finito di punti vicini (dotati anch'essi di direzione), ottenuto attraverso la media vettoriale.

Viene sviluppato il comportamento locale di allineamento tra gli assi del piano di riferimento e quelli relativi ai piani degli agenti circostanti, circoscritti ad una soglia sferica di prossimità.

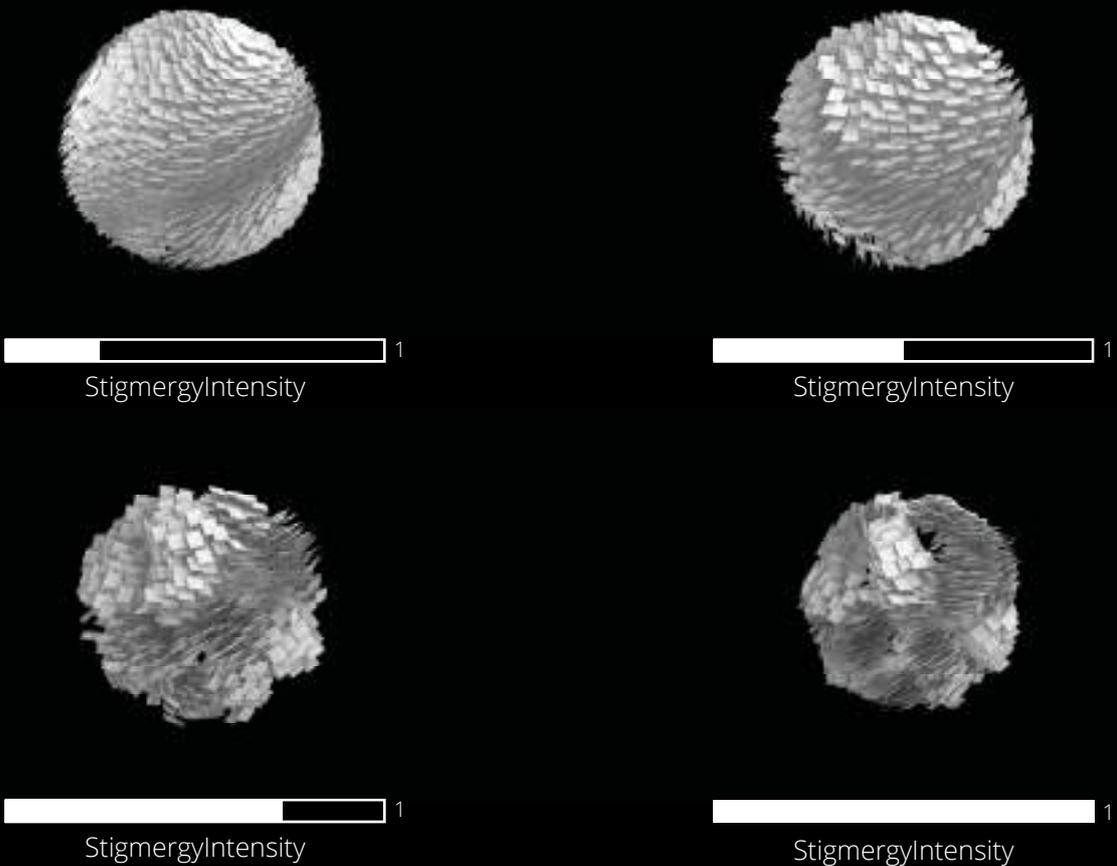
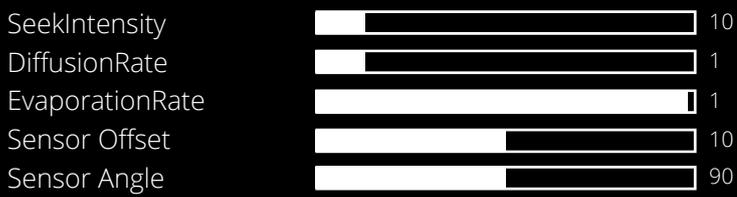
### Global Params



### Flocking Params



### Stigmergy Params



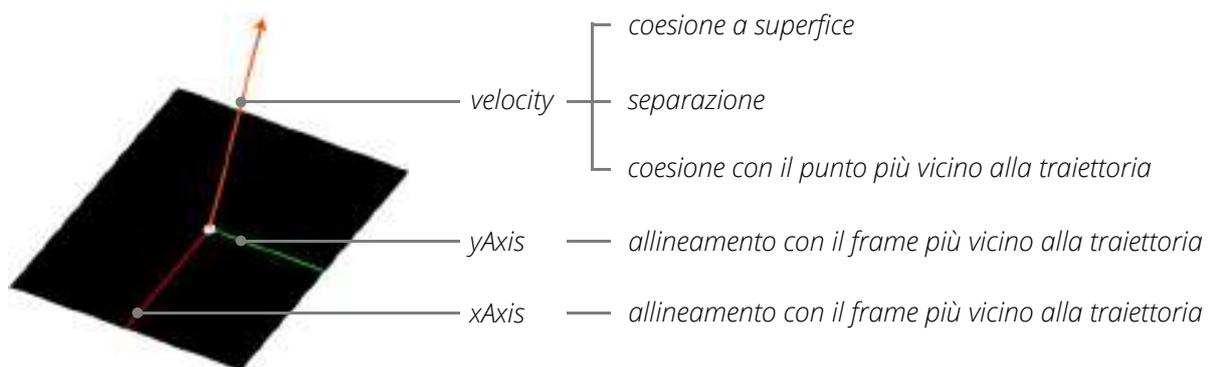
3.3.18 Risultati ottenuti variando l'intensità stigmergica

In questa fase di esplorazione ci si è resi conto dei limiti del sistema, in quanto all' aumentare del contributo stigmergico, i comportamenti di separazione e coesione vengono meno, fondamentali invece per assicurare coerenza geometrica e per evitare compenetrazione materica.

I risultati sono molto influenzati anche dalla percentuale di popolazione, in quanto, anche se i comportamenti di separazione e coesione non sono rispettati, al variare della popolazione, le configurazioni ottenute cambiano notevolmente a causa della negoziazione di forze di natura stigmergica, di separazione, coesione e allineamento.

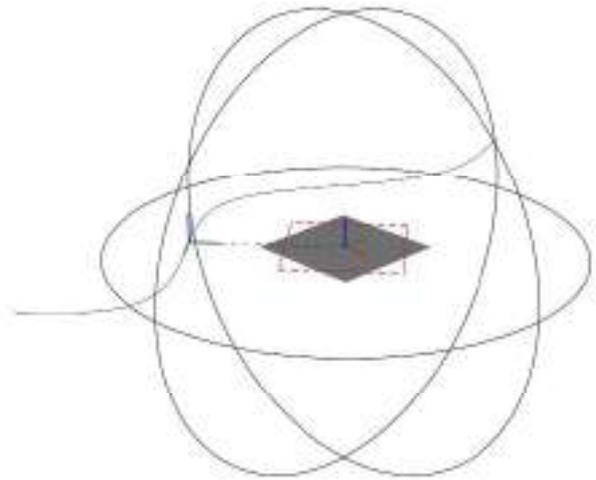
Queste considerazioni hanno portato ad un cambio approccio, dove il sistema stigmergico si sviluppa senza essere influenzato da altri comportamenti, e successivamente i piani assumono comportamenti di coesione con le traiettorie stigmergiche e allineamento con i frame di queste traiettorie e coesione a superficie.

In questo modo è stato possibile raggiungere una balance tra tutte le forze in gioco, in quanto anche all' aumentare dei piani, le forze di separazione hanno il giusto peso.



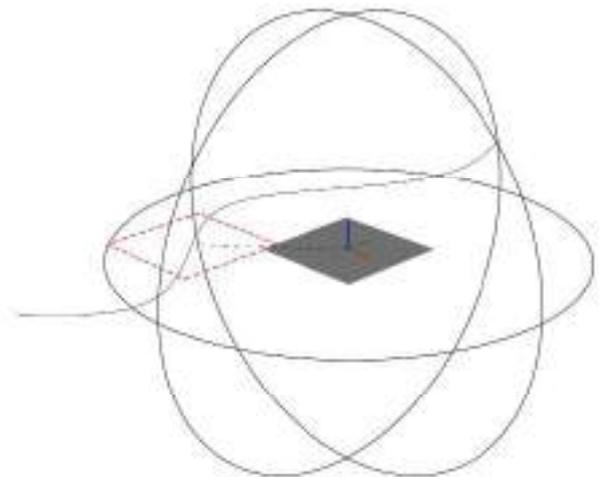
## ALLINEAMENTO AL FRAME

Viene sviluppato il comportamento locale di allineamento tra gli assi del piano di riferimento e quelli relativi al frame più vicino della curva.



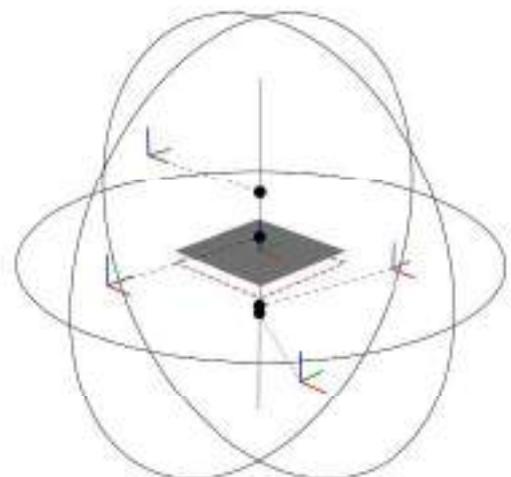
## COESIONE ALLA CURVA

Ogni agente entro una soglia sferica di prossimità analizza, se esistono, traiettorie interne a tale contorno e calcola il vettore spostamento verso il `closestPoint` alla curva. In tal modo viene calcolato il vettore che, applicato al piano di riferimento, tende a portare il piano verso la curva più vicina.



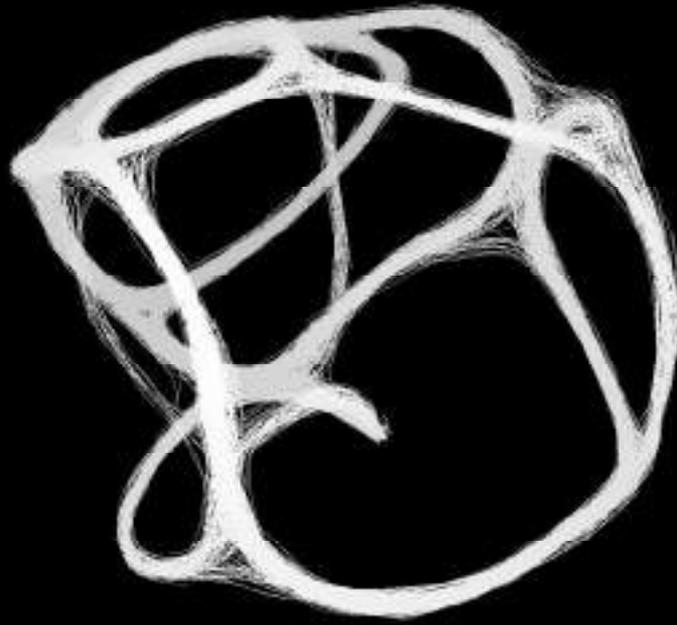
## COESIONE A SUPERFICE

Ogni agente entro una soglia sferica di prossimità analizza la posizione degli altri agenti definendo coordinate relative al proprio sistema di riferimento. Attraverso le coordinate normale al piano proprio degli agenti circostanti viene calcolata la posizione del punto medio dell'insieme di punti individuati sulla normale al piano. Ogni piano si muove in direzione normale al proprio piano di riferimento verso il punto medio.

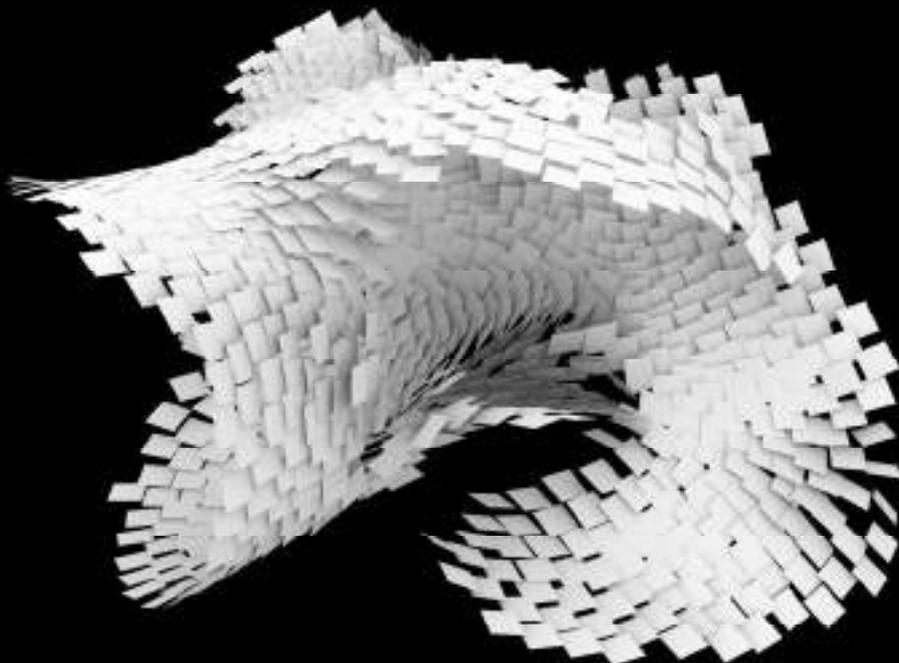


### Global Params

|                      |   |       |
|----------------------|---|-------|
| AgentPlanes          |  | 5 000 |
| NeighborhoodRadius   |  | 10    |
| SeparationRadius     |  | 5     |
| SurfCohesionStrength |  | 10    |
| AlignmentStrength    |  | 5     |
| SeparationStrength   |  | 10    |



traiettorie



piani orientati

Ecco che la somma di tutte queste forze porta il sistema ad auto organizzarsi, ed i piani, durante la simulazione, avvolgono le traiettorie stigmergiche e creano, quando il sistema raggiunge la fase di equilibrio, una pseudo-superficie.

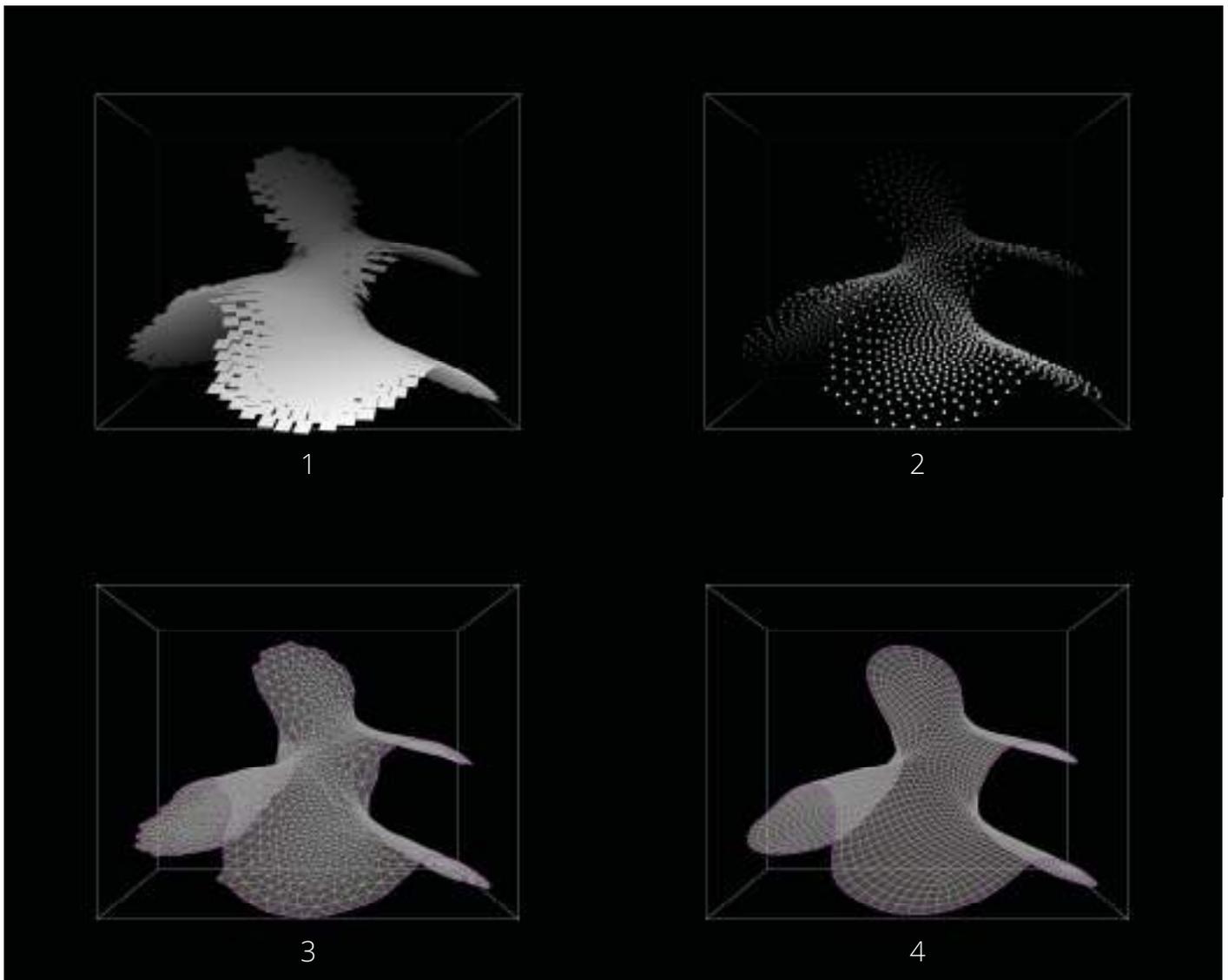
1. Per permettere coerenza geometrica e per poter svolgere analisi strutturali sulle geometrie è stato necessario seguire un processo di trasformazione da piani a superficie.

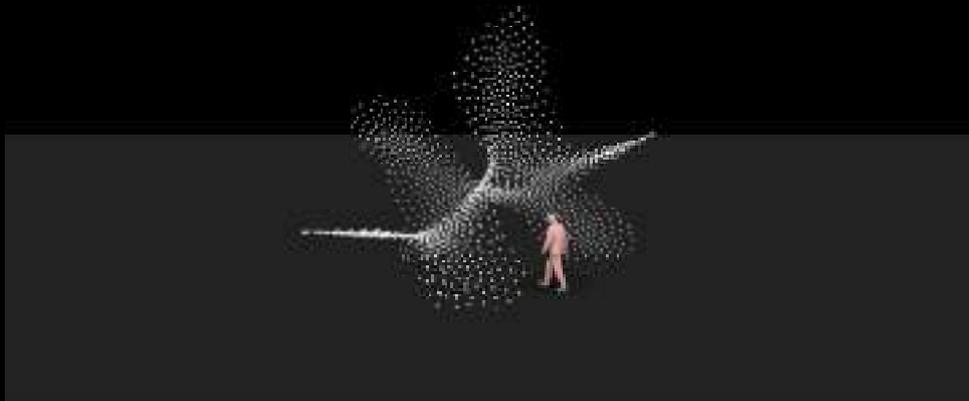
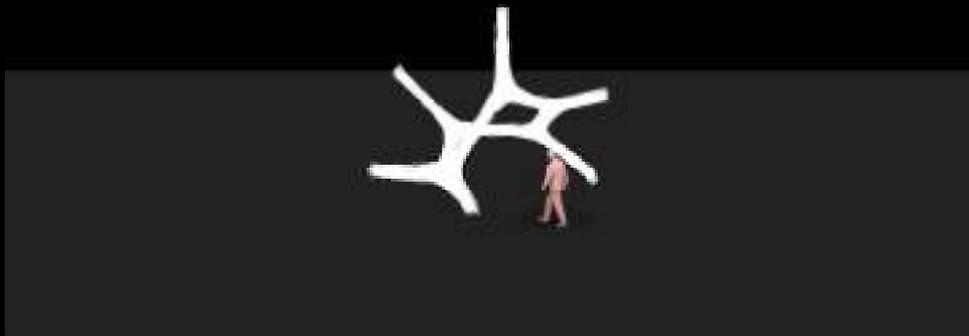
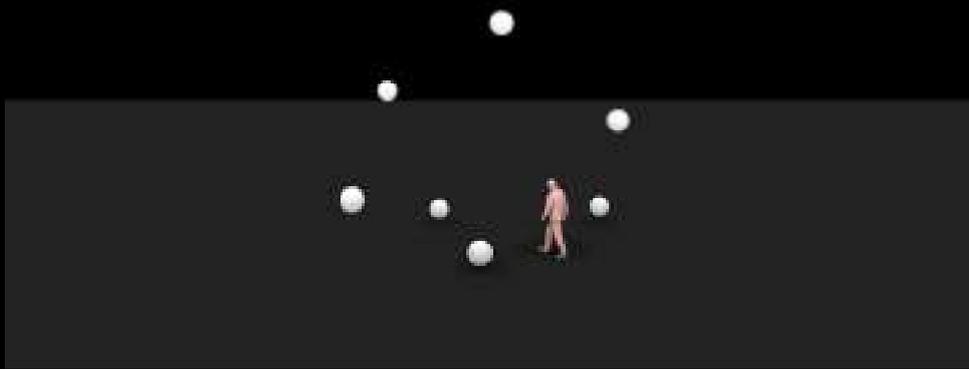
2. Nel passaggio da pseudosuperficie a superficie è stata creata una nuvola di punti, ricavata dalle origini dei piani.

3. Attraverso un algoritmo di ricostruzione superficiale (Ball Pivoting), è stata ottenuta una mesh a maglia triangolare create sulla traccia della nuvola di punti. Ogni punto della pointCloud corrisponde ad un vertice della mesh ottenuta.

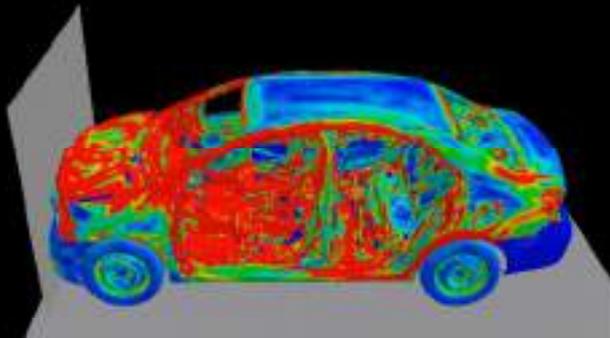
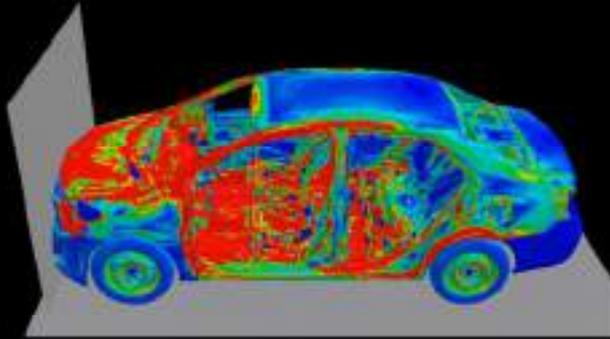
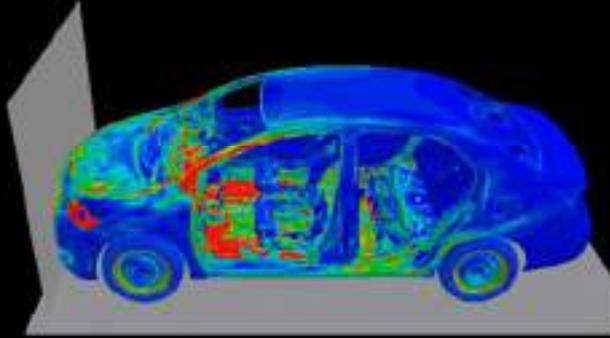
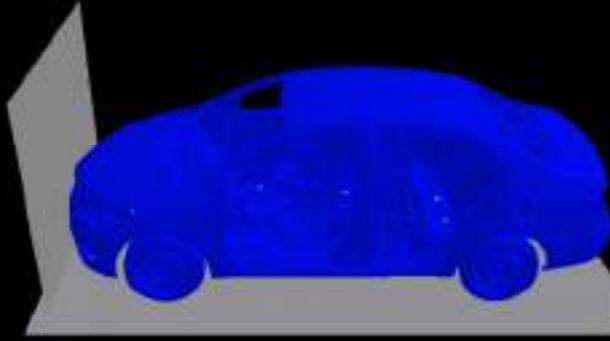
4. La mesh viene ritopologizzata e rimeshata in modo da ottenere una mesh a maglia quadrata, topologia ottimale per eseguire analisi ad elementi finiti.

**3.3.19** Sotto: workflow - da pseudo-superficie a superficie.





3.3.20 Workflow - dai chemoattrattori alla superficie

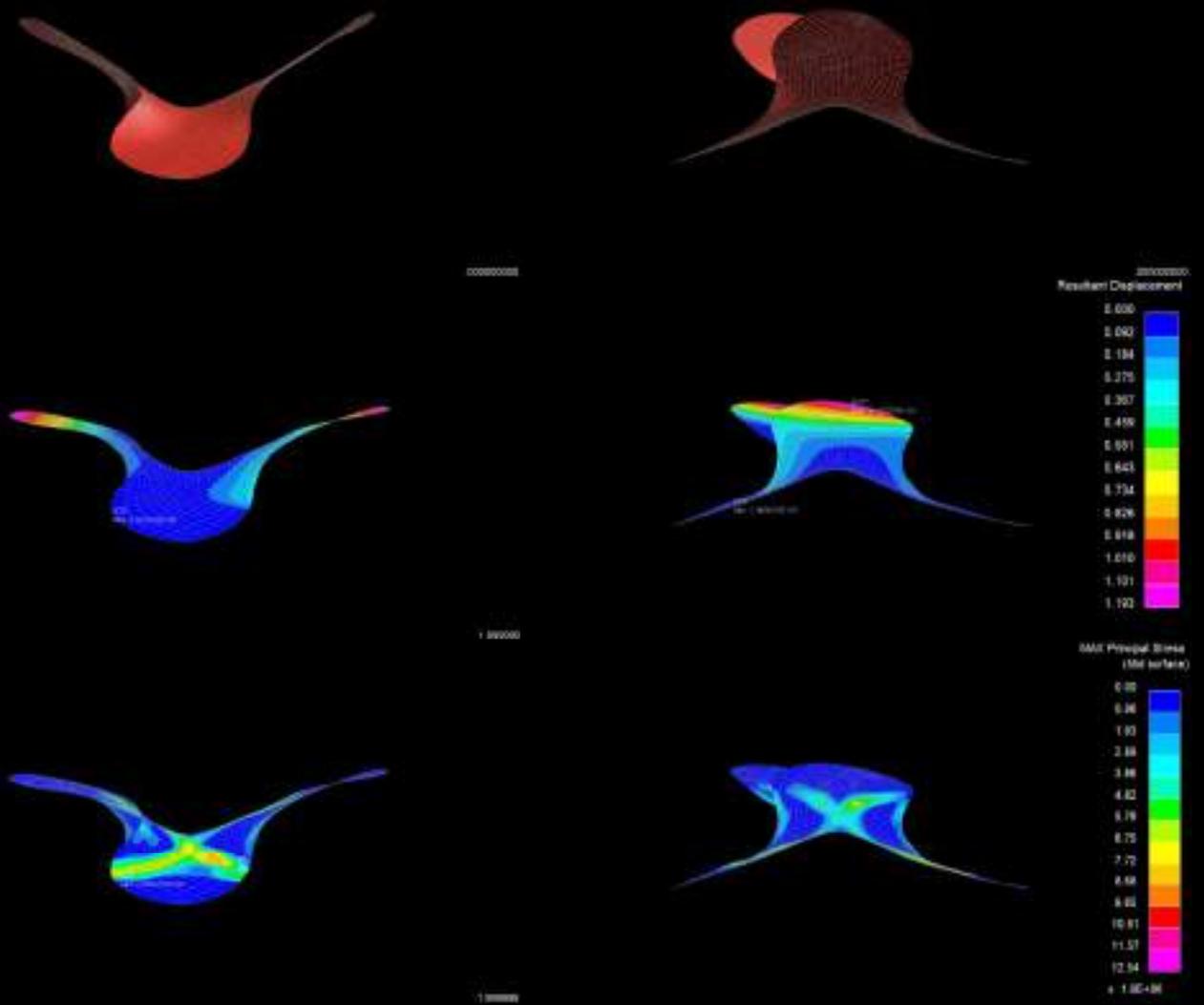


## 3.4 DESIGN PROCESS

### LS-DYNA

LS-DYNA è un avanzato software di simulazione multifisica di uso generale. Mentre il pacchetto continua a contenere sempre più possibilità per il calcolo di molti problemi complessi del mondo reale, le sue origini e la sua competenza principale risiedono nell'analisi dinamica altamente non lineare ad elementi finiti (FEA) utilizzando l'integrazione temporale esplicita. LS-DYNA è usato dall'industria automobilistica, aerospaziale, delle costruzioni e dell'ingegneria civile, militare, della produzione e della bioingegneria.

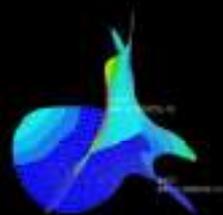
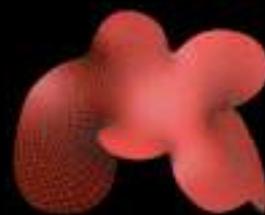
**3.4.1.** *A lato: simulazione di un crash test di un'auto contro un piatto indeformabile. Oasys Ls-Dyna.*



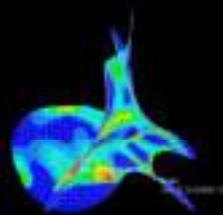
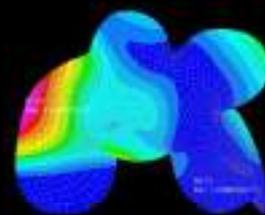
3.4.2. analisi NLTH su due mesh di esempio



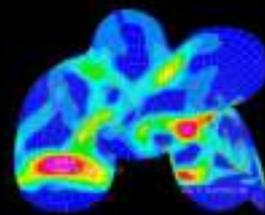
0.000000



1.000000



1.000000

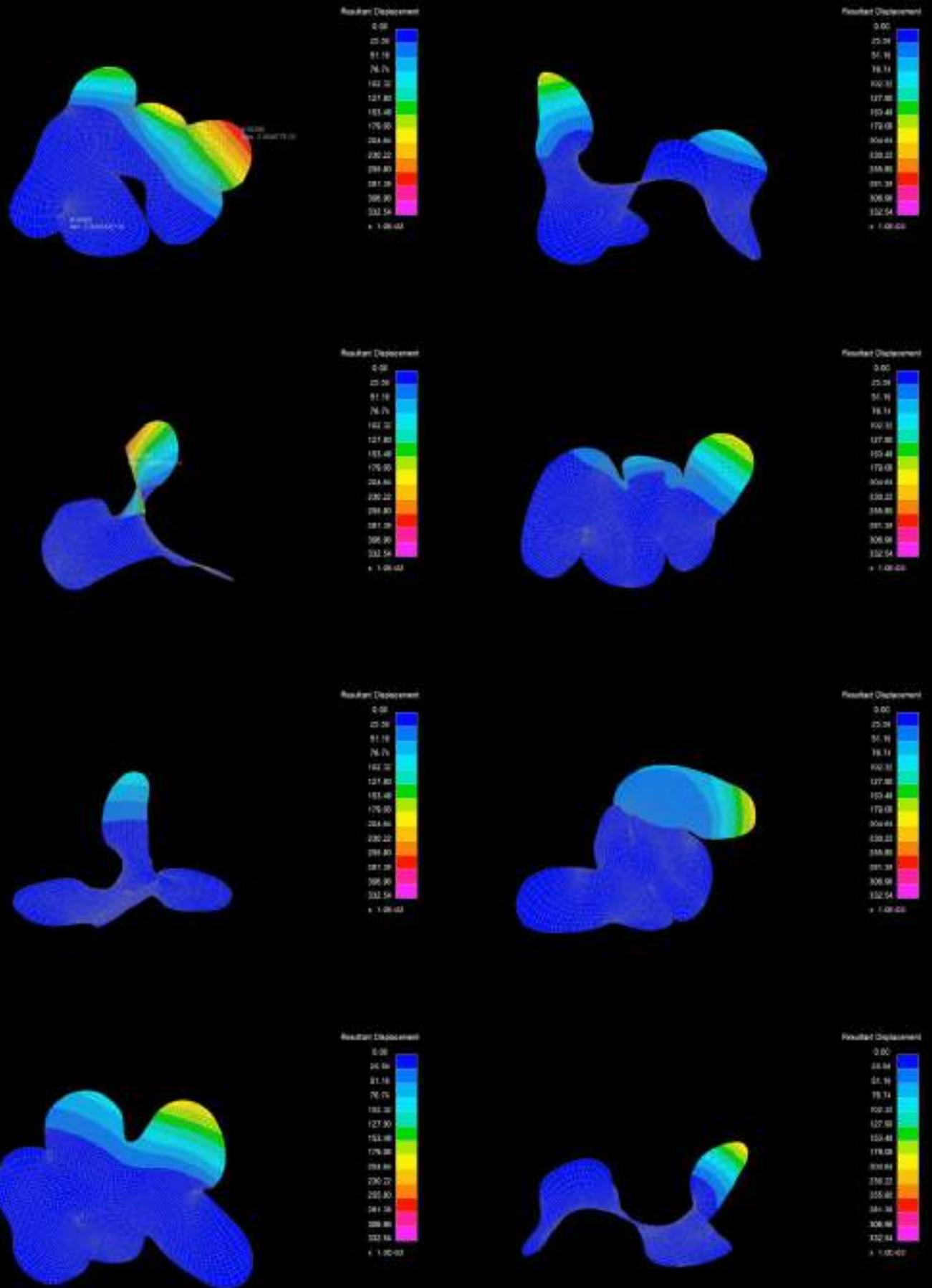


0.000000  
Resultant Displacement

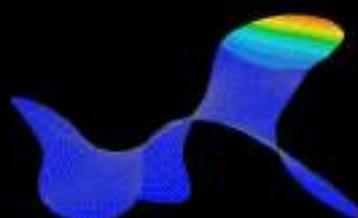
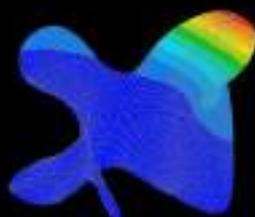
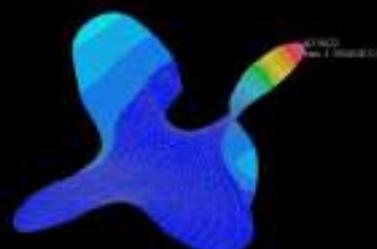
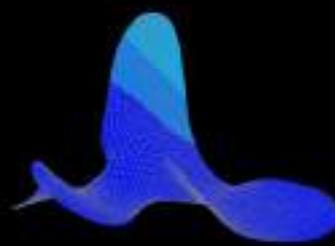


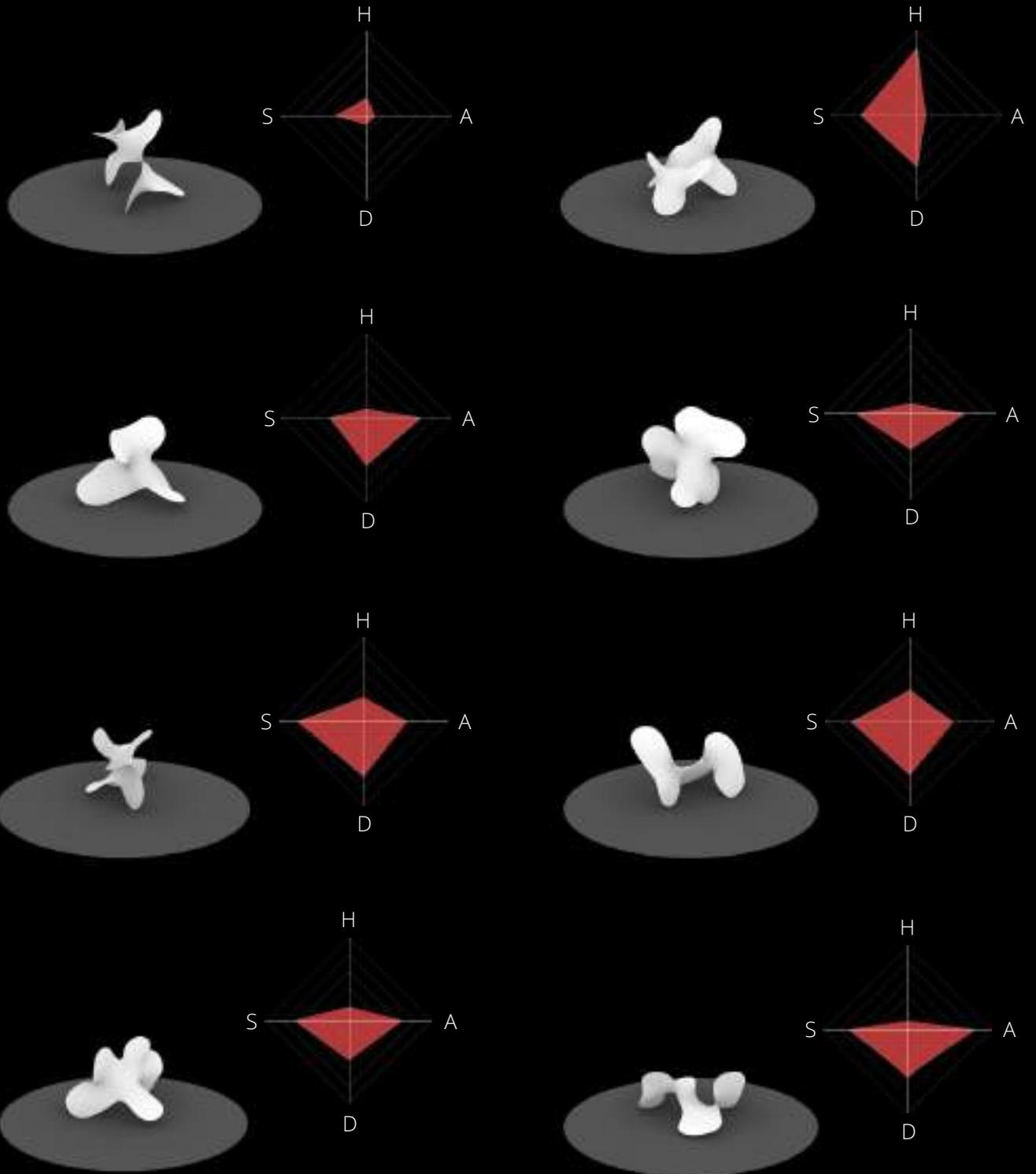
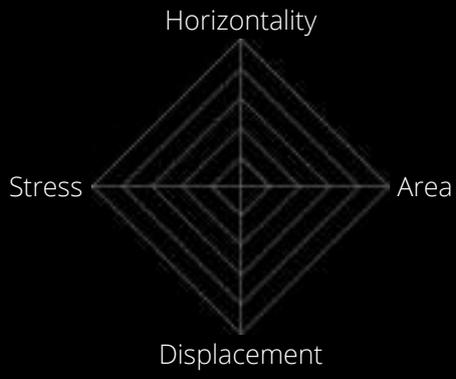
0.000000  
VM (Mid surface)



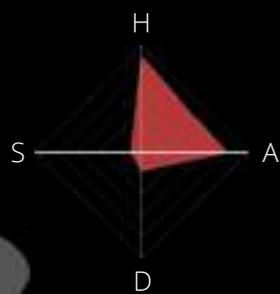
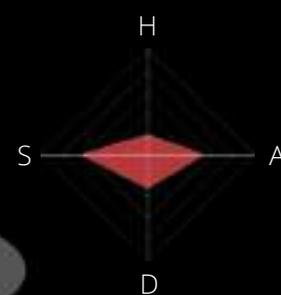
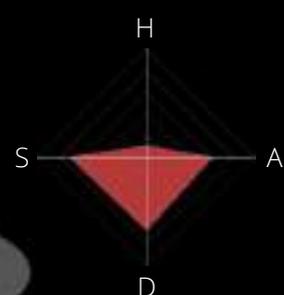
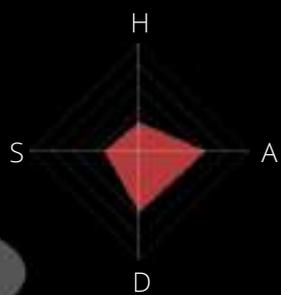
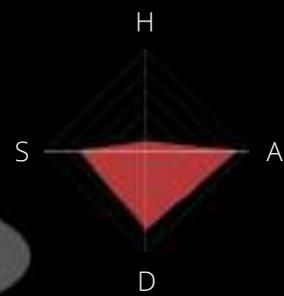
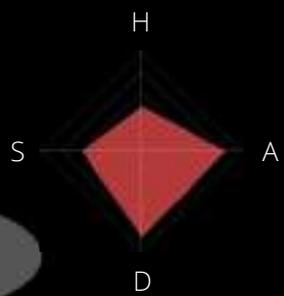


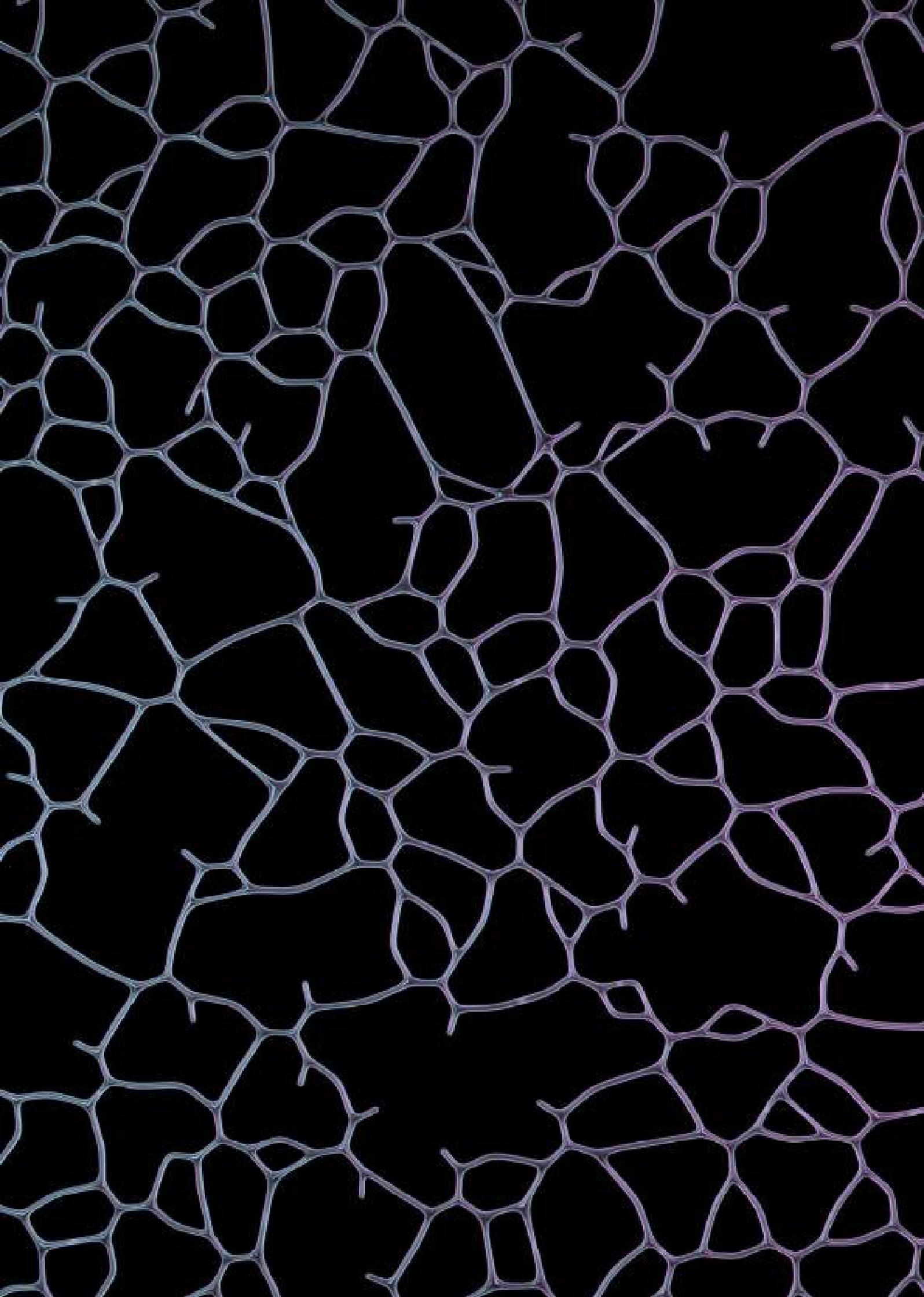
3.4.3. displacement contour





3.4.4. analisi dei risultati



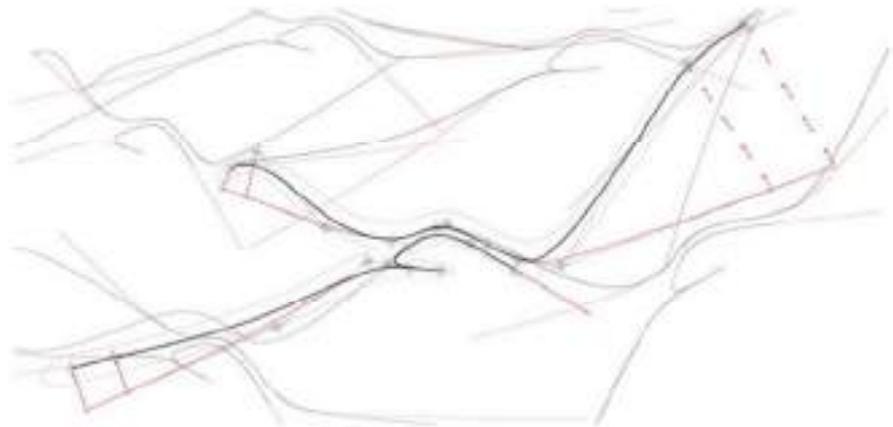


## 3.5 DESIGN PROCESS

### AGENTBODY

Gli algoritmi multi-agente come l'algoritmo Boid di Craig Reynold (1987) considerano l'agente come un punto nello spazio cartesiano. Gli algoritmi multi-agente sviluppati per questa implementazione attingono alla logica auto-organizzativa dell'intelligenza dello sciame e incorporano gli agenti in strutture gerarchiche descritte come agentBodies. La concettualizzazione dell'agentBody assomiglia alla logica dei ponti di formiche, dove è la geometria interconnessa dei corpi delle formiche che forma la materia strutturale o architettonica. Tali connessioni emergono attraverso feedback tra i comportamenti degli agentBody vicini all'interno dell'algoritmo generativo.

Quando questi comportamenti sono condizionati da forze strutturali, come deflessione e momenti flettenti su una superficie in fibra composita, i modelli generati dagli agentBodies sono una negoziazione tra i comportamenti progettati per generare modelli emergenti e quelli che resistono al carico strutturale.



L'introduzione del concetto di agentbody nella ricerca sviluppata dallo Studio Roland Snooks è fondamentale per estendere il dominio di potenzialità generative dell'algoritmo multi-agent verso l'ambito di costruzione a scala architettonica, risulta inoltre particolarmente interessante alla luce delle attuali metodologie nell'integrazione di criteri fabbricativi e materiali all'interno della progettazione computazionale.

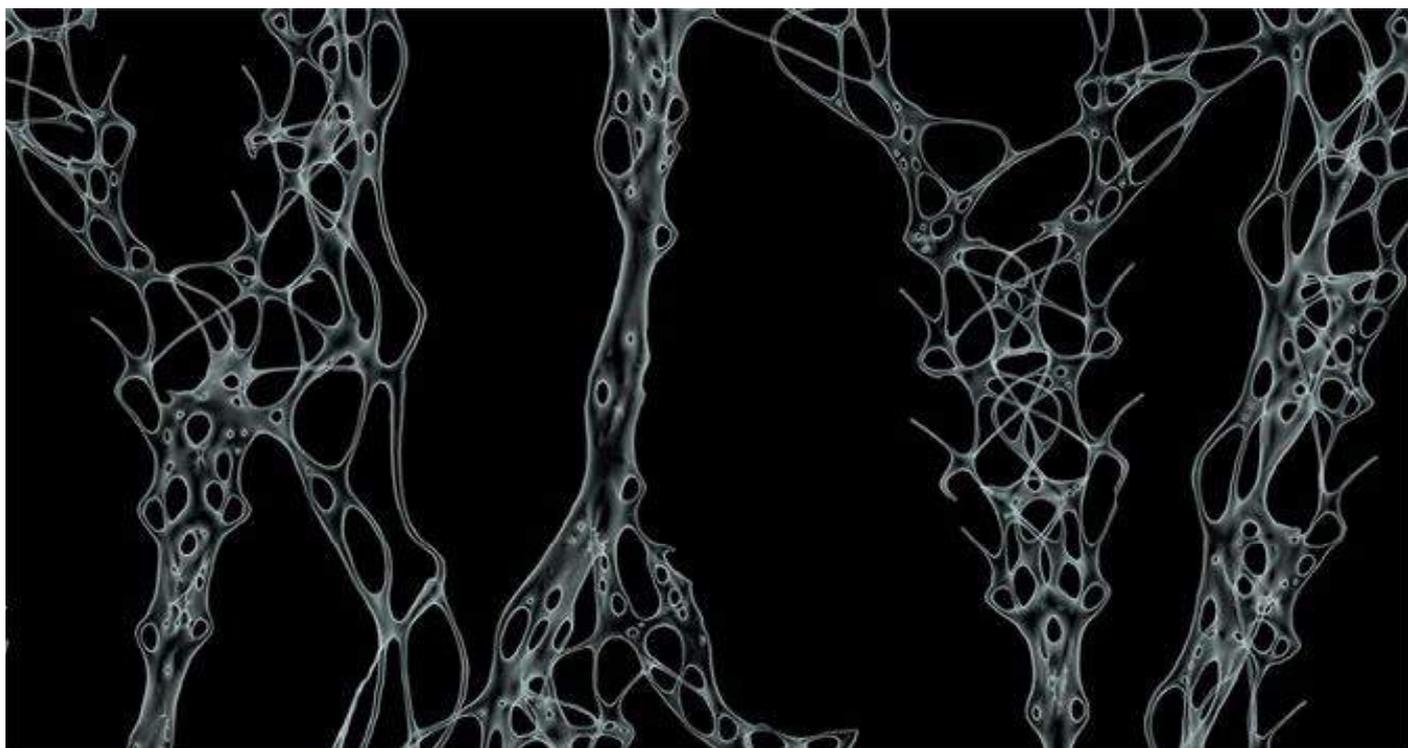
L'obiettivo di tale ricerca, attualmente ancora in corso, risiede nell'attribuzione all'algoritmo multi-agent di una gamma di strategie progettuali finalizzate alla prototipazione.

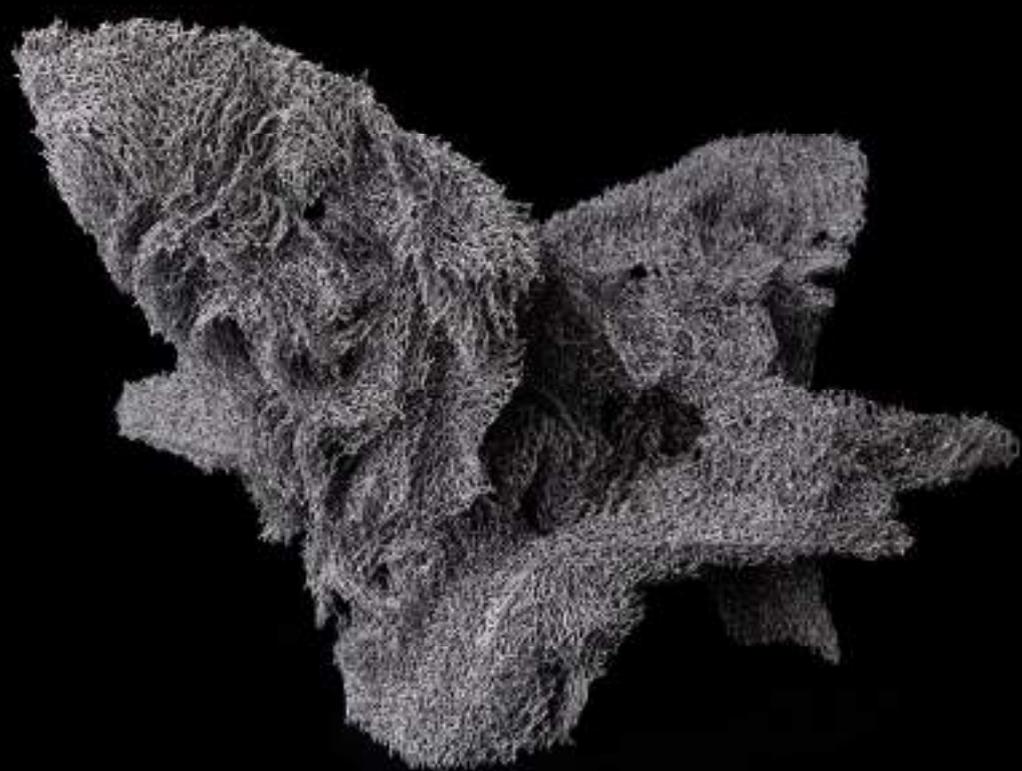
Per agentBody si intende infatti il modello spaziale dotato di topologia specifica attraverso il quale le relazioni tipiche di sciame si concretizzano in strutture geometriche di ordine superiore.

**3.5.1.** In alto: diagrammi di un agentBody. KOKKUGIA.

**3.5.2.** A lato: nine elms centre pompidou Roland Snooks, Paris, 2018

**3.5.3.** In basso: Swarm Matter. KOKKUGIA, 2009.





# COMPONENTE A

L'agentBody è costituito da due parti, una parte che rimane fissa durante la variazione tettonica ed una parte composta da tentacoli.

Gli agenti, attraverso i tentacoli, sono portati a connettersi reciprocamente secondo le regole di prossimità caratteristiche del comportamento di coesione. Ciò avviene alla scala dei singoli punti (tips) caratterizzando ogni tentacolo.

La ricerca avviene sulla base della parziale visione che ogni agentPoint ha degli altri circostanti e il movimento viene calcolato in termini di coordinate polari tra la tip terminale del tentacolo ed il target.

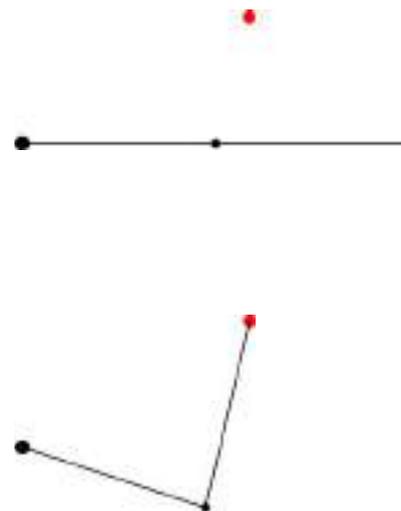
Il comportamento che ne deriva è uno spostamento distribuito nelle singole unità che tendono a migrare verso punti medi comuni.

Il sistema viene informato nella scala del singolo agente che al di sotto di una singola soglia di prossimità il punto si muova nella direzione del prossimo punto circostante.

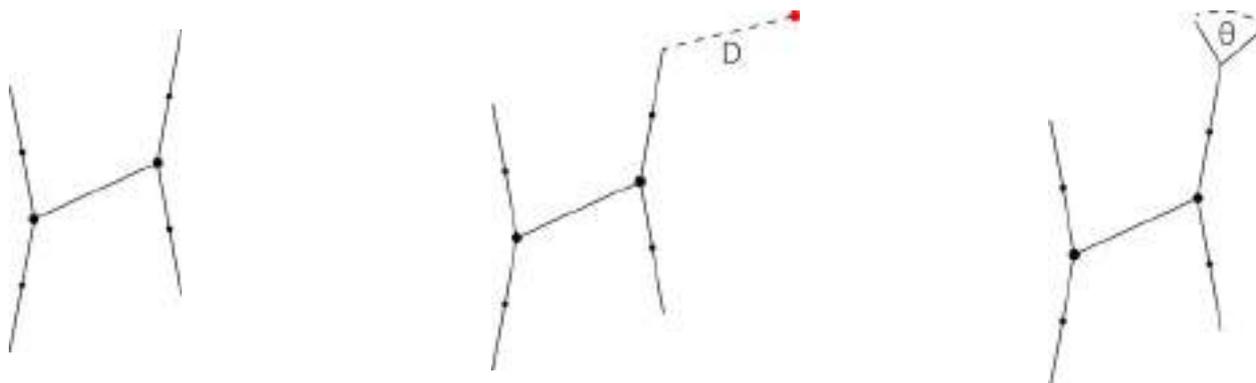
Si instaurano in tal modo relazioni spaziali più specifiche con le quali è possibile definire le connessioni tra i tentacoli.

All'espressione spaziale del comportamento di coesione e connessione vengono attribuite limitazioni di angoli e di lunghezze. L'obiettivo di tale operazione è conferire ambienti estensivi nella manifestazione dei comportamenti, ovvero assegnare range specifici di ammissibilità affinché si conservi la topologia di agentbody nel tempo e nello spazio.

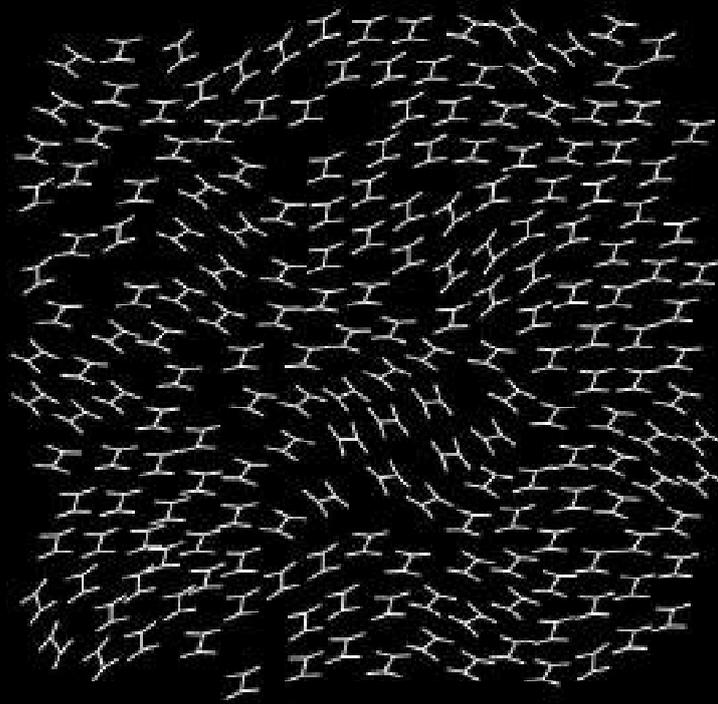
Le limitazioni topologiche attribuite al processo devono essere considerate proprio alla luce della potenzialità che il sistema generativo conservi il proprio grado di coerenza interna anche in ambito di espressione architettonica.



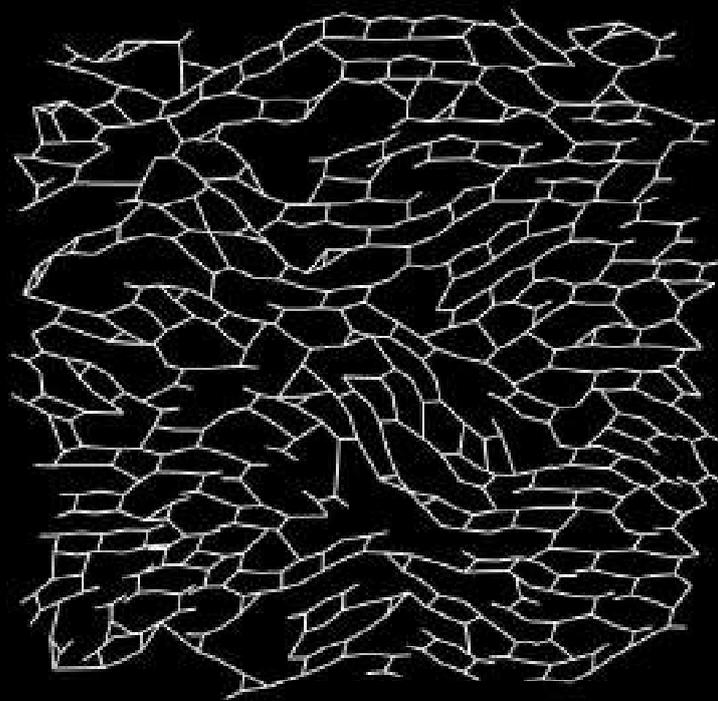
3.5.4. In alto: tentacolo durante il processo di locking



3.5.5. In basso: agentbody e limitazioni topologiche

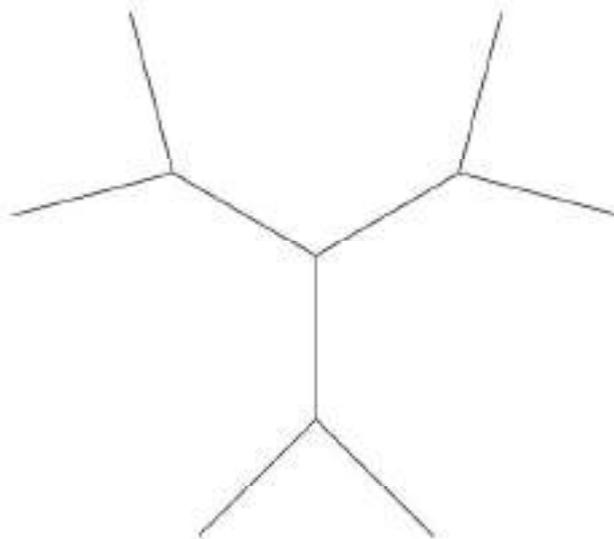
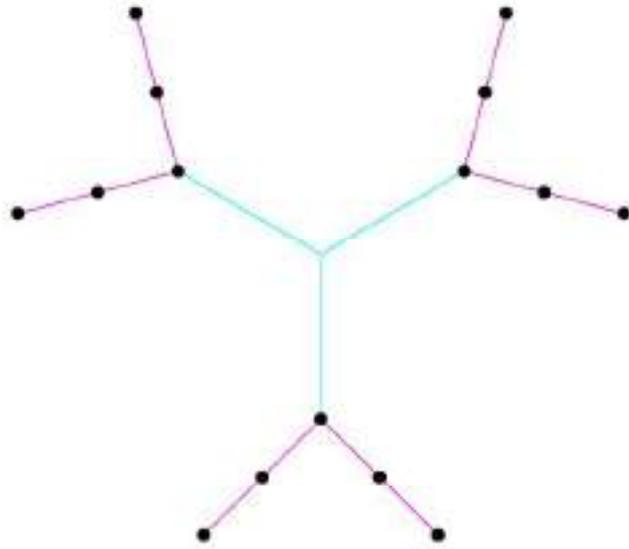


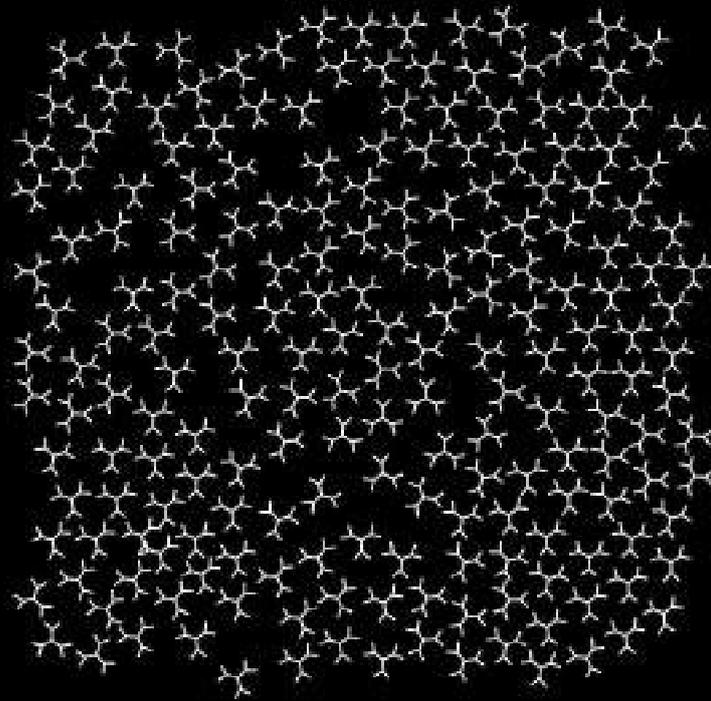
pre locking



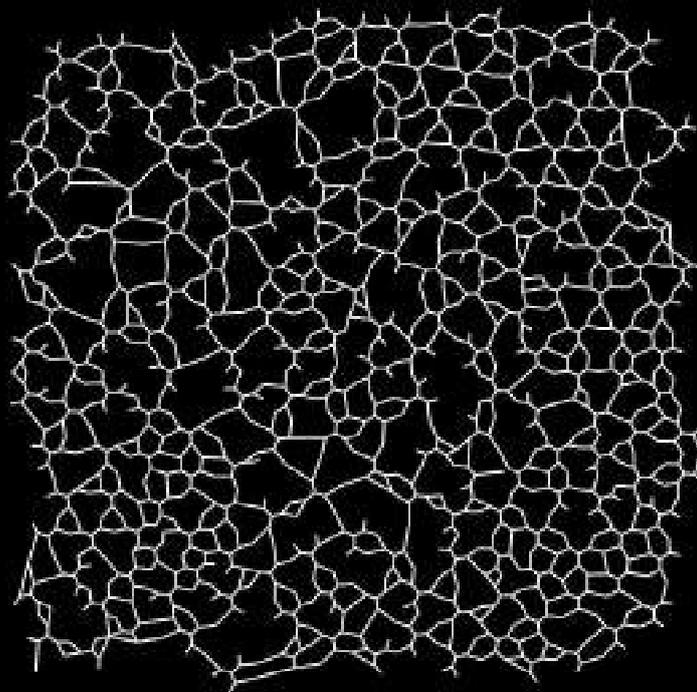
post locking

# COMPONENTE B

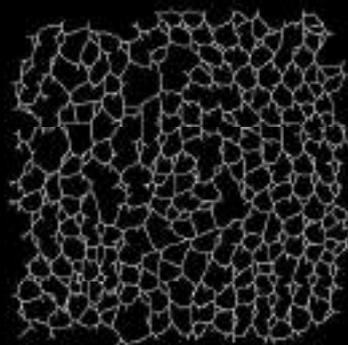
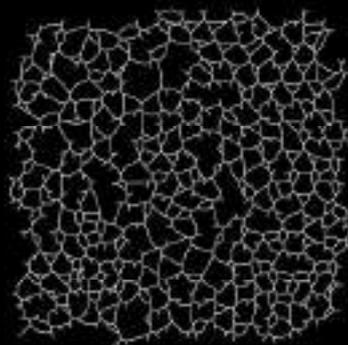
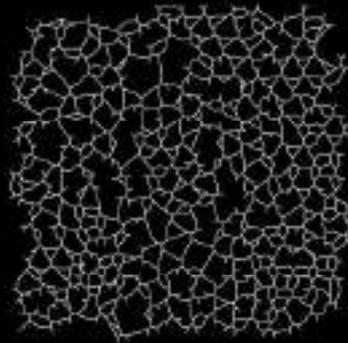
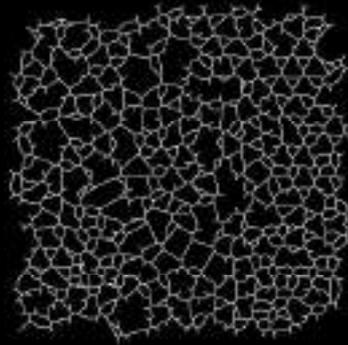
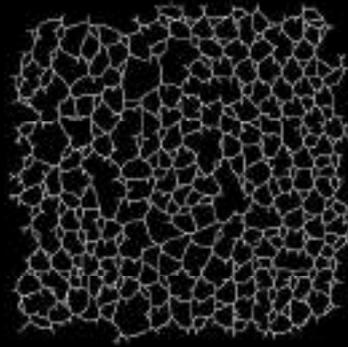




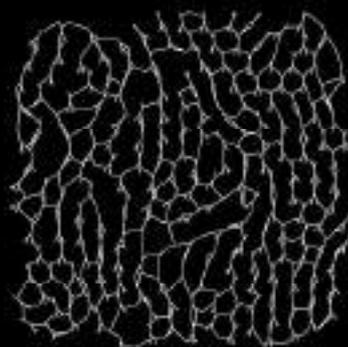
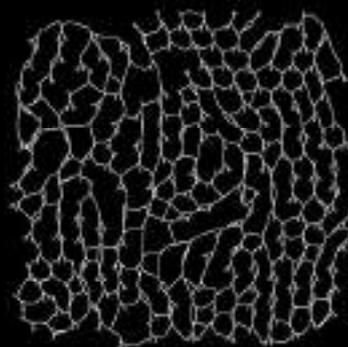
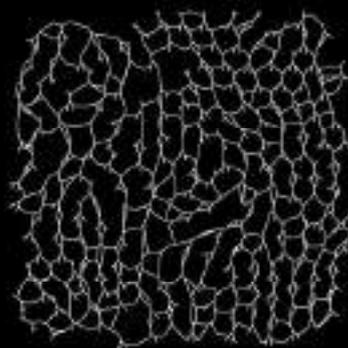
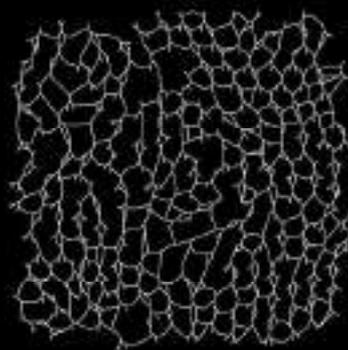
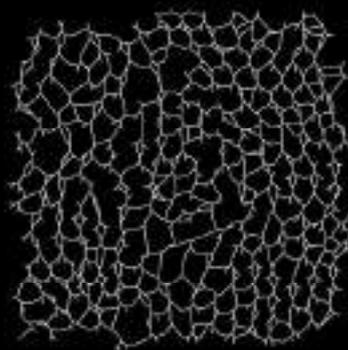
pre locking

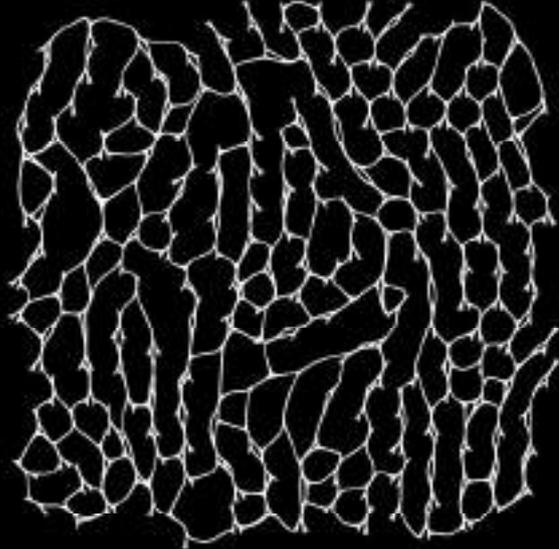
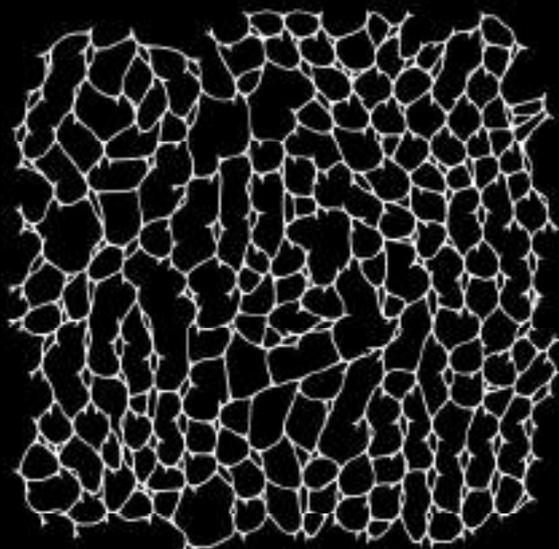
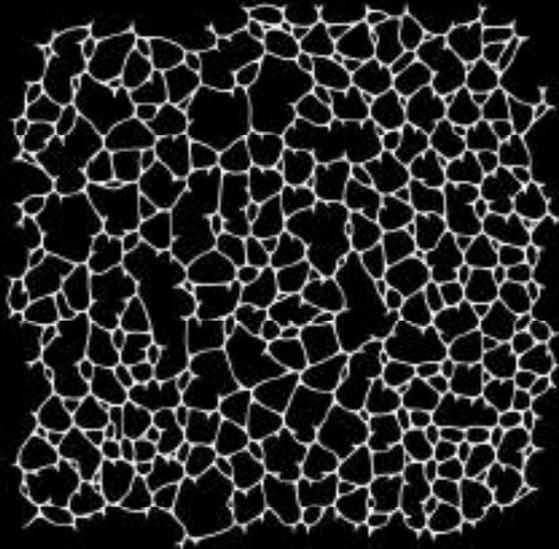
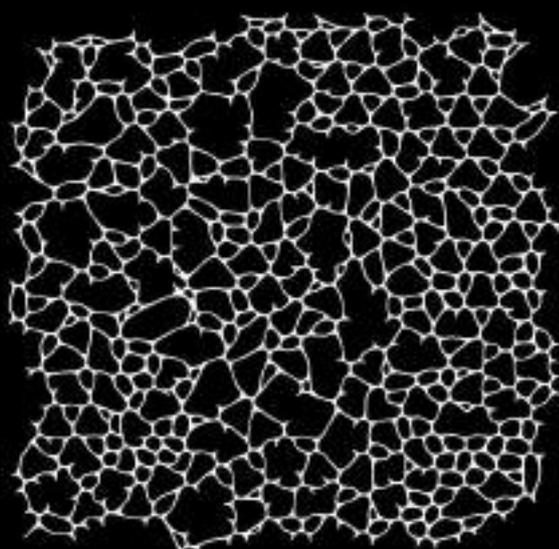


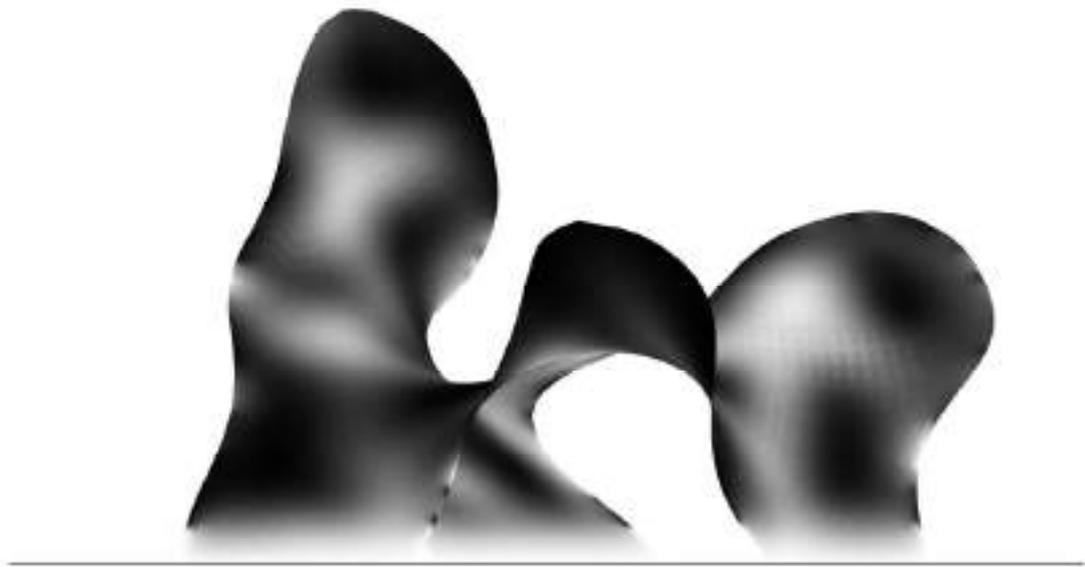
post locking



3.5.7. pattern risultanti al variare degli angoli tra i tentacoli







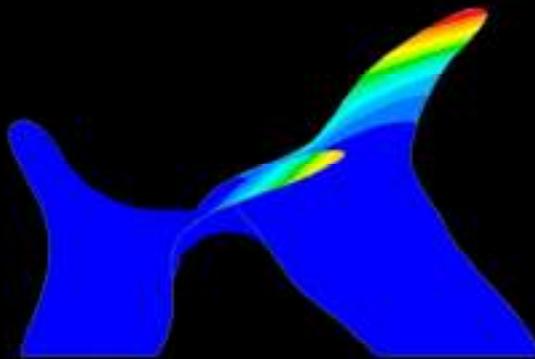
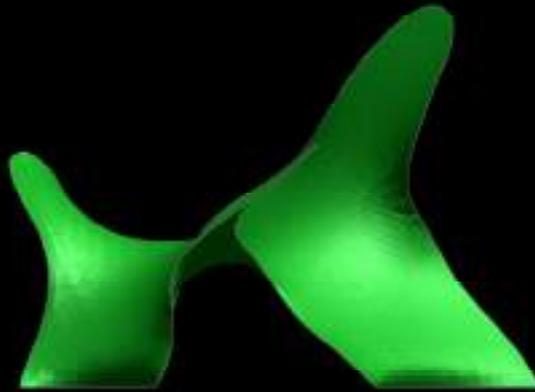
stress pattern



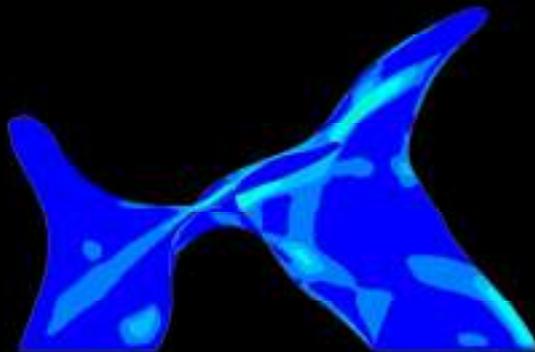
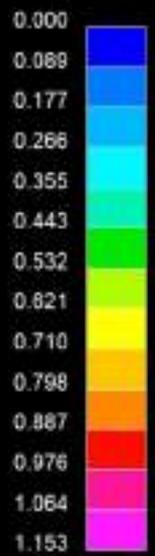
ornamento su mesh



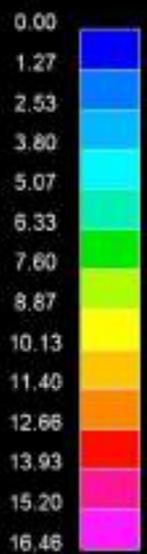
unione



Resultant Displacement

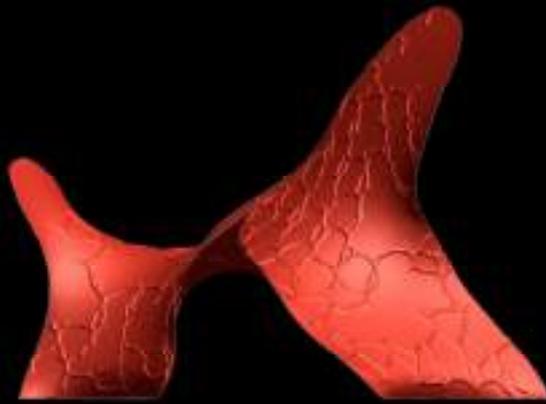


MAX Principal Stress  
(Mid surface)

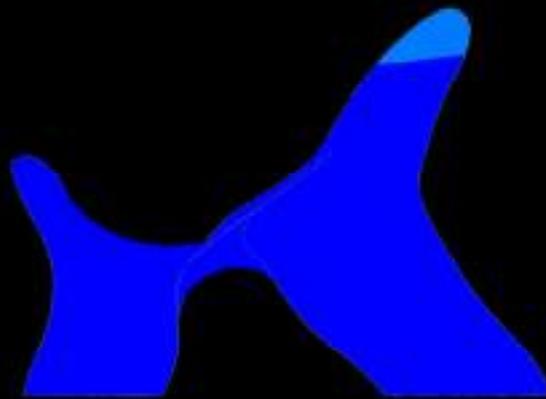


x 1.0E+06

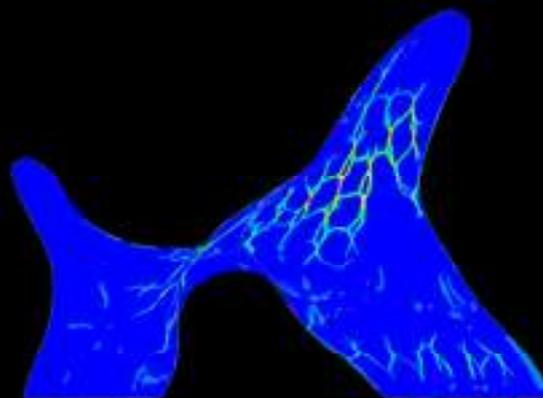
3.5.8. analisi NLTH pre e post ornamento.



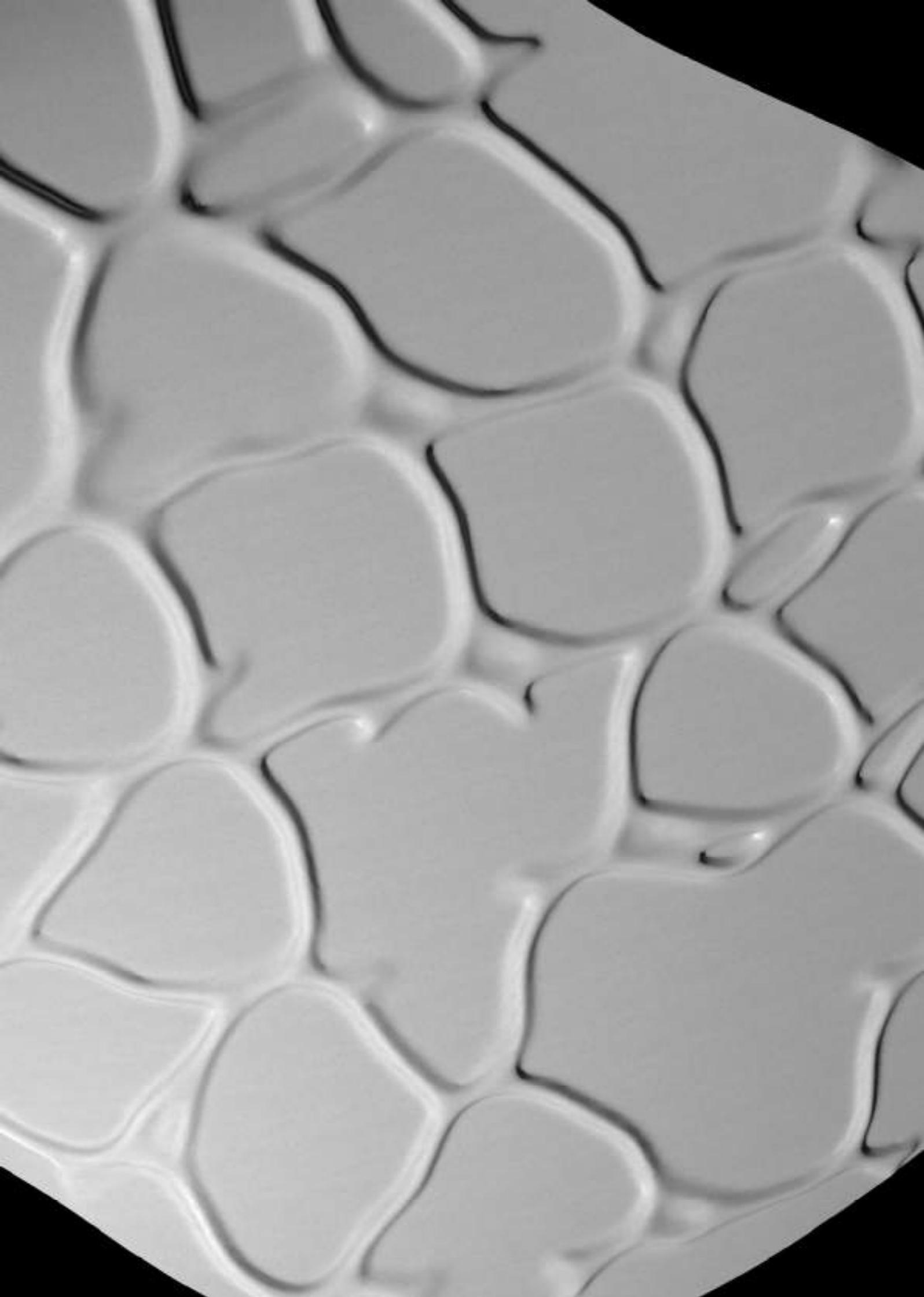
Resultant Displacement



MAX Principal Stress  
(Mid surface)



x 1.0E+06



# 4.0 MATERIALI E FABBRICAZIONE

## MATERIALI FIBROCOMPOSITI

I materiali fibrorinforzati a matrice polimerica o semplicemente materiali fibrorinforzati costituiscono una vasta gamma di materiali compositi, costituiti da una matrice polimerica di natura organica con la quale viene impregnato un rinforzo in fibra continua con elevate proprietà meccaniche. Si distinguono dai compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM), in cui la matrice inorganica, a base di cemento o di calce viene rinforzata con reti realizzate con fibre continue.

Già nell'antichità si era capito che accoppiando diversi materiali fra di loro si ottenevano prodotti finiti con caratteristiche migliori: un esempio sono i mattoni realizzati con argilla e paglia essiccati al sole, utilizzati dalle civiltà della Mesopotamia.



Per avere i primi materiali compositi in FRP bisogna aspettare il XX secolo: infatti solo nei primi anni quaranta viene prodotto il primo manufatto (una barca) in vetroresina. Negli anni sessanta compaiono le fibre di carbonio ad alta resistenza e di boro; mentre nei primi anni settanta vede la luce la fibra aramidica, con il nome commerciale di kevlar.

Dato il processo di produzione, sono materiali prevalentemente eterogenei, e hanno un comportamento di deformazione elastica fino a rottura. Si confrontano usualmente con l'acciaio in quanto sono prevalentemente resistenti a trazione, ma hanno un peso notevolmente minore rispetto ad essi ed alcuni compositi (fibra di carbonio) possono arrivare ad avere anche una rigidità a deformazione tre volte maggiore.

In edilizia è ampiamente utilizzata soprattutto per il consolidamento di edifici in muratura, ma sono in corso diverse ricerche in campo tecnologico per ampliarne il raggio di applicazione.

**4.0.1.** In alto: mattoni composti da paglia e fango.

**4.0.2.** In basso: Composite Swarm. Roland Snooks, 2013.



Sono state scelte due tipologie differenti di fibrocompositi per la struttura, vetroresina per la superficie e fibra di carbonio per l'ornamento. La fibra di carbonio brilla davvero per quanto riguarda la sua resistenza alla trazione. Come fibra grezza è solo leggermente più resistente della fibra di vetro, ma diventa incredibilmente forte se combinato con le giuste resine epossidiche. In effetti, la fibra di carbonio è più resistente di molti metalli se fabbricata nel modo giusto. Per questo motivo è stata impiegata nelle zone sottoposte al massimo livello di stress. La fibra di vetro invece, tende ad essere più flessibile della fibra di carbonio ed è circa 15 volte meno costosa. Per applicazioni che non richiedono la massima rigidità, come per le zone con un minor livello di stress, la fibra di vetro è il materiale preferito.

**4.0.3.** *In basso: Printed assemblages.*  
Roland Snooks.

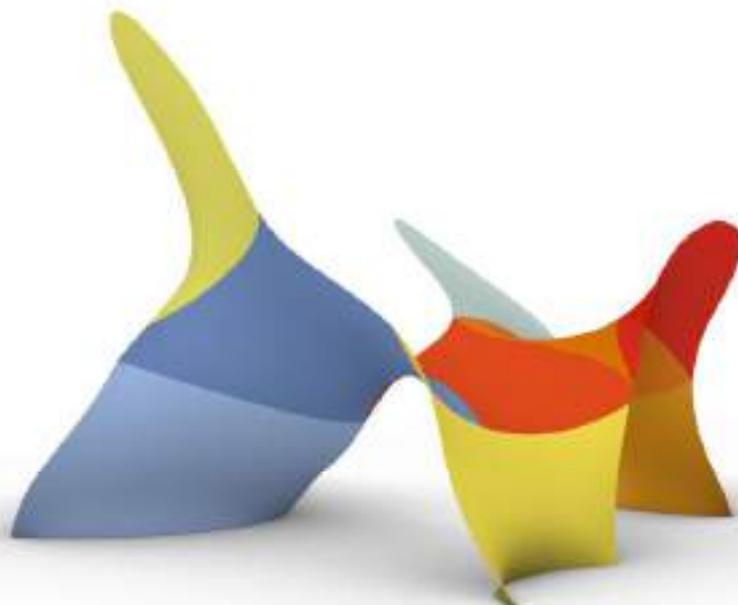


# MOLD

A causa dell'unicità della forma, è stato necessario, per eseguire il processo di laminazione del materiale fibrocomposito, la progettazione di un mold. Si è adottata una fabbricazione FDM a materiale polimerico, con la quale è possibile ottenere forme molto precise con un minimo spreco di materiale. Il mold è stato suddiviso in modo che l'ingombro di ogni porzione ottenuta ricadesse all'interno del massimo raggio operativo medio di un braccio robotico.

Successivamente alla fabbricazione, le parti andranno posizionate su di una centina, che ha la funzione di sorreggere lo stampo durante l'assemblaggio ed il processo di laminazione

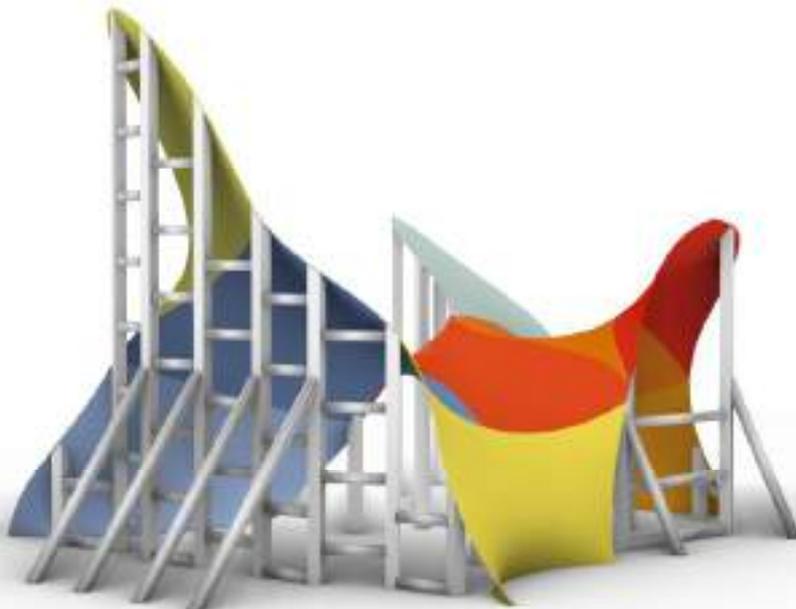
**4.0.4.** *In basso: suddivisione del mold*





**4.0.5.** *In alto: processo di 3D printing del mold*

**4.0.6.** *In basso: mold su centina*



# ORNAMENTO

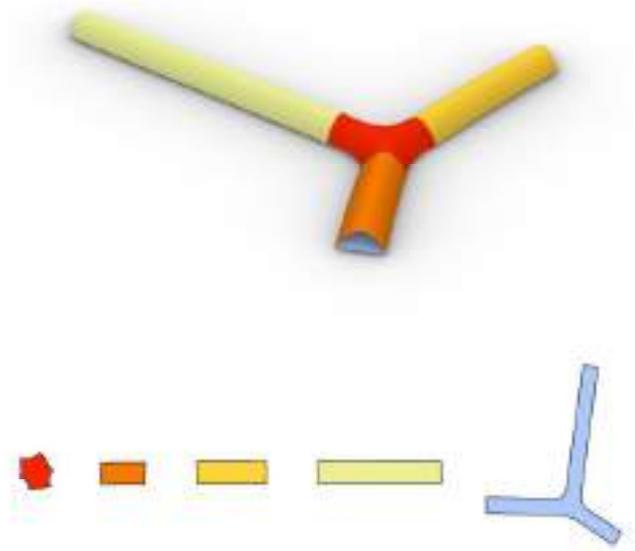
Come spiegato in precedenza, il sistema integrato di ornamento è realizzato in fibra di carbonio.

Per eseguire il processo di laminazione dell'ornamento è necessaria la creazione di un secondo mold che garantisca un supporto per lo strato in fibra di carbonio, è stata quindi realizzata una struttura inflatabile, costituita da tubolari a sezione a mezzaluna con un diametro di 2cm in PVC.

La struttura è stata suddivisa in porzioni costituite dalle congiungenti dei nodi, le cui parti costituenti vengono ottenute a partire da un abaco di taglio ottenuto dall'unrolling delle parti stesse.

Ne segue una giunzione per termosaldatura delle parti costituenti, in modo da ricostituire il sistema di ornamento iniziale.

La struttura inflatabile viene successivamente gonfiata con un compressore ad aria ed infine si applica sulla struttura il materiale fibrocomposito.

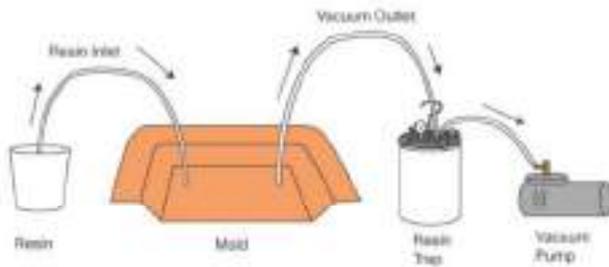


**4.0.7.** In alto: nodo inflatabile e abaco di taglio

**4.0.8.** In basso: gonfiaggio dell'inflatabile



# VACUUM INFUSION PROCESS



**4.0.9.** In alto: vacuum infusion process

Il Vacuum Infusion Process (VIP) è una tecnica che utilizza la pressione del vuoto per guidare la resina in un laminato. I materiali secchi sono posati nello stampo e il vuoto viene applicato prima di introdurre la resina. Una volta raggiunto il vuoto completo, la resina viene letteralmente risucchiata nel laminato attraverso un tubo accuratamente posizionato. In un tipico lay-up manuale, i rinforzi sono posti in uno stampo e bagnati manualmente con spazzole, rulli o altri mezzi. Un miglioramento di questo metodo è l'uso di un sacco a vuoto per aspirare la resina in eccesso dal laminato. Il sacco a vuoto migliora notevolmente il rapporto fibra-resina e si traduce in un prodotto più forte e leggero.

1. Una pila di materiale asciutto da laminare è posta in uno stampo a tenuta stagna.
2. Un film flessibile (comunemente noto come sacco a vuoto) è posto sopra il laminato e sigillato allo stampo oltre il perimetro del laminato.
3. Si effettuano almeno due connessioni al sacco; una per permettere l'eliminazione dell'aria dalla cavità tra il sacco e lo stampo e l'altra per permettere l'ingresso della resina liquida.
4. Con la linea di ingresso della resina temporaneamente CHIUSA, la cavità tra il sacco e lo stampo viene evacuata da una pompa del vuoto.
5. Dopo questa evacuazione preliminare, il sacco e lo stampo dovrebbero essere temporaneamente chiusi dalla pompa del vuoto e il livello di vuoto rimanente nel pezzo dovrebbe essere osservato su un vacuometro.
6. Una volta raggiunto un livello soddisfacente di tenuta stagna, la linea della pompa a vuoto può essere riaperta. Il contenitore di alimentazione della resina può essere riempito di resina mista e la linea di alimentazione della resina può essere aperta. Con la linea di alimentazione della resina aperta, la resina liquida sarà forzata nel pezzo dalla DIFFERENZA DI PRESSIONE tra la pressione atmosferica che agisce sulla resina e il livello di vuoto nel pezzo.
7. Quando si usano resine termoindurenti, dopo che il laminato è stato completamente infuso con la resina, è necessario prevedere un periodo di tempo per la polimerizzazione della resina.
8. Una volta che la resina si è solidificata, il sacchetto e la parte possono essere rimossi dallo stampo.

**4.0.10.** In basso: Infusion process. Horizon.



Una pila di materiale asciutto da laminare è posta in uno stampo a tenuta stagna.

Un film flessibile (comunemente noto come sacco a vuoto) è posto sopra il laminato e sigillato allo stampo oltre il perimetro del laminato.

Si effettuano almeno due connessioni al sacco; una per permettere l'eliminazione dell'aria dalla cavità tra il sacco e lo stampo e l'altra per permettere l'ingresso della resina liquida.

Con la linea di ingresso della resina temporaneamente CHIUSA, la cavità tra il sacco e lo stampo viene evacuata da una pompa del vuoto.

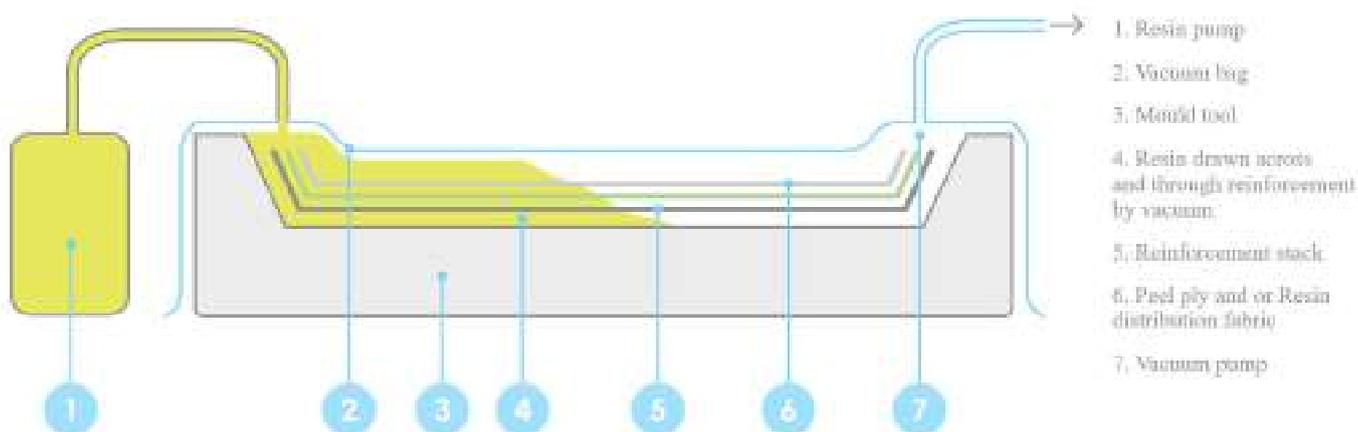
Dopo questa evacuazione preliminare, il sacco e lo stampo dovrebbero essere temporaneamente chiusi dalla pompa del vuoto e il livello di vuoto rimanente nel pezzo dovrebbe essere osservato su un vacuometro.

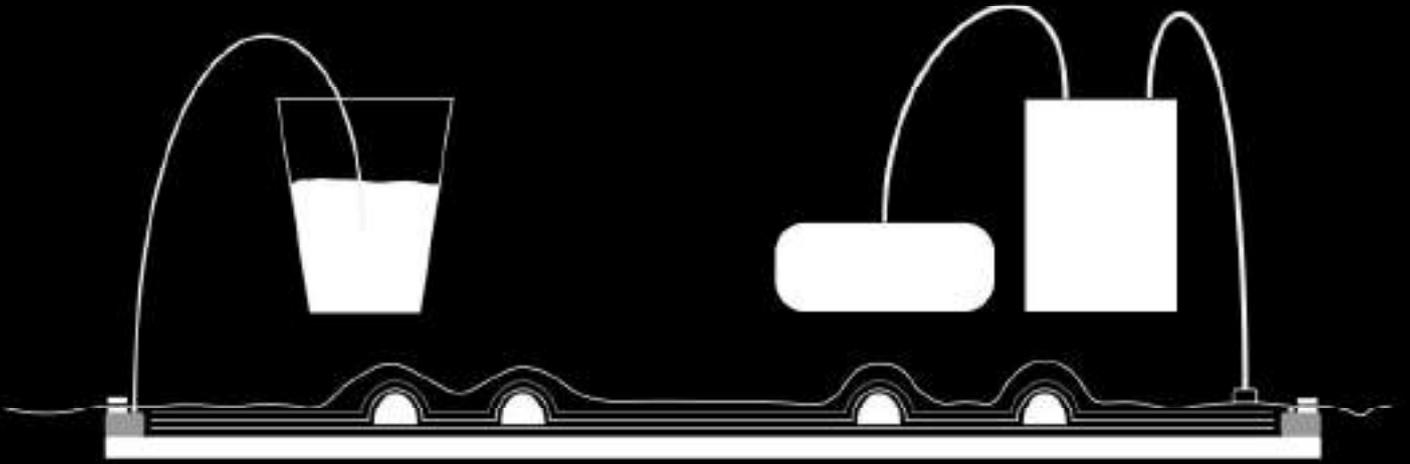
Una volta raggiunto un livello soddisfacente di tenuta stagna, la linea della pompa a vuoto può essere riaperta. Il contenitore di alimentazione della resina può essere riempito di resina mista e la linea di alimentazione della resina può essere aperta. Con la linea di alimentazione della resina aperta, la resina liquida sarà forzata nel pezzo dalla DIFFERENZA DI PRESSIONE tra la pressione atmosferica che agisce sulla resina e il livello di vuoto nel pezzo.

Quando si usano resine termoindurenti, dopo che il laminato è stato completamente infuso con la resina, è necessario prevedere un periodo di tempo per la polimerizzazione della resina.

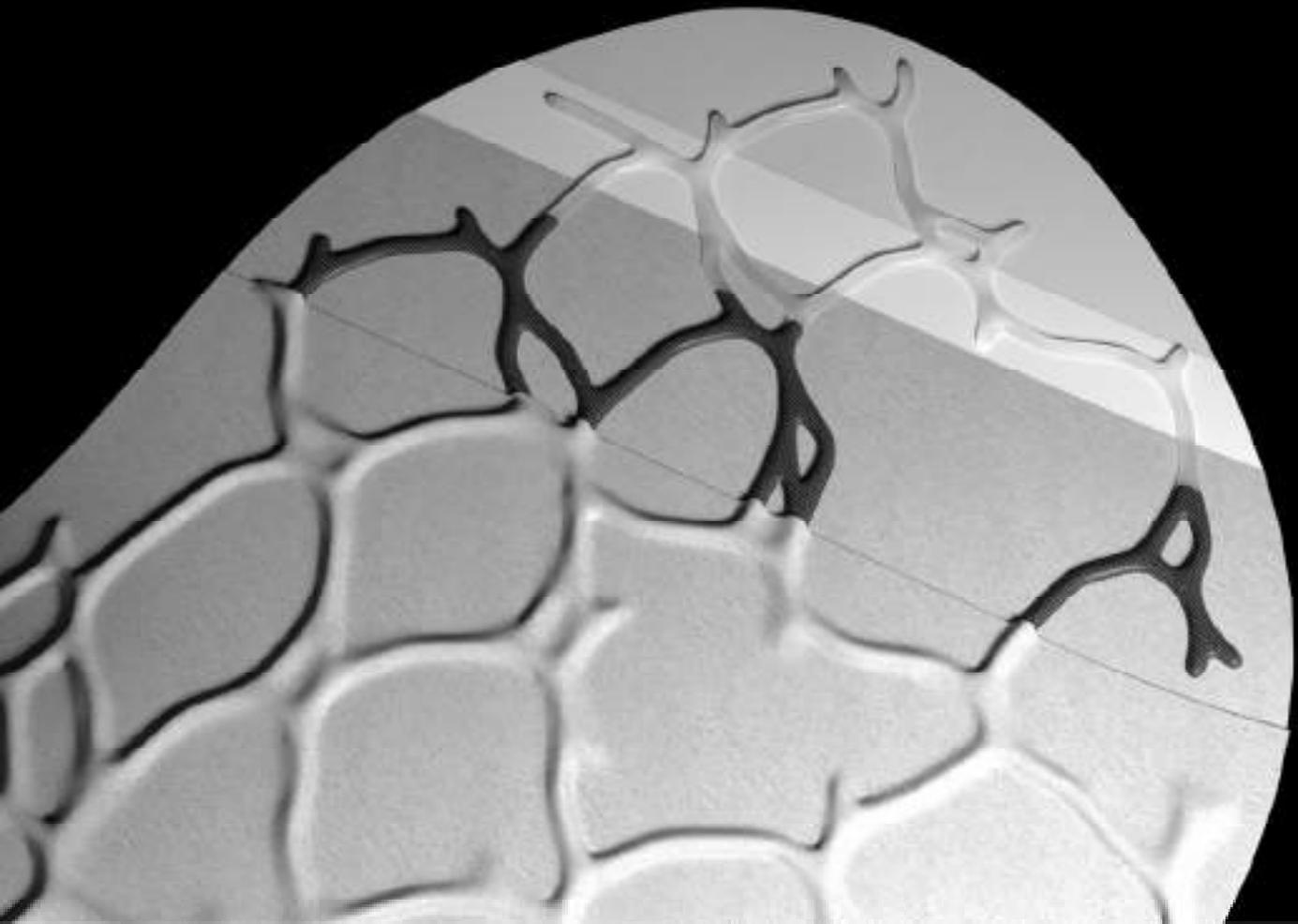
Una volta che la resina si è solidificata, il sacchetto e la parte possono essere rimossi dallo stampo.

**4.0.11.** In basso: vacuum infusion section.





processo di infusione sottovuoto





## 5.0 APPLICAZIONE ARCHITETTONICA

Le ricerche su emergenza e tettonica nel capitolo 3 sono state realizzate non tenendo conto del risultato estetico finale, ma con l'obiettivo di operare secondo logiche di tipo bottom up e di indagare le capacità materiali dei fibrocompositi applicate al processo.

Durante la fase di ricerca della tesi, come affermato in precedenza, si è proceduto ad integrare i risultati ottenuti dal processo digitale con i vincoli e potenzialità emerse dalle analisi NLTH con Ls-Dyna, ragionando principalmente su forme superficiali autogenerate e quindi non su diffusioni che agissero tramite campi e spazi condivisi. Queste considerazioni portano alla scelta del padiglione espositivo come applicazione architettonica, sia delle qualità costruttive, che espressive e morfologiche della struttura stessa.

Il padiglione si presenta come un'installazione sull'acqua dove, grazie al gioco di luce dato dal riflesso delle acqua, la struttura esprime le sue proprietà di traslucenza e trasparenza superficiale.







## 6.0 CONCLUSIONI

La ricerca ha esplorato le potenzialità architettoniche di tettoniche di superficie in materiale fibrocomposito mediante combinazione di processi di auto-organizzazione e ottimizzazione strutturale. Alla luce dei risultati ottenuti nello sviluppo del processo generativo e fabbricativo, è possibile leggere la ricerca come un tentativo di estendere le potenzialità espressive, morfologiche e costruttive derivanti dai sistemi multi agente verso l'ambito di esplorazione architettonica.

Il lavoro si pone, quindi, in continuità con i più attuali filoni di ricerca, nella definizione degli scenari architettonici condotti con l'introduzione di algoritmi generativi nella pratica progettuale.

Nello specifico, la tesi ha l'obiettivo di analizzare i vantaggi e le problematiche relative all'introduzione di nuovi gradi di complessità spaziale senza lo scopo di predeterminare finalità in materia formale.

I risultati conseguiti possono considerarsi soddisfacenti a fronte dei software e delle strumentazioni utilizzate e stimolano ulteriormente la ricerca verso l'integrazione sempre più completa di feedback tra ambiente progettuale e pratica costruttiva, affinché l'esplorazione architettonica possa beneficiarne sia in termini di estetica sia di fattibilità.

Tra le possibili direzioni di sviluppo futuro, quella con maggiore possibilità di legare la ricerca alla realizzazione è sperimentare la compatibilità di ulteriori forme computazionali e tecniche costruttive, che possano essere fabbricate senza l'ausilio di un supporto, questo ridurrebbe di gran lunga le risorse impiegate per la fabbricazione, sia in termini di tempistiche, che di materiali.

## REFERENCES

Braitenberg, Valentino. 1984. "Vehicles: Experiments in synthetic psychology". Cambridge, MA: MIT Press.

Erioli, Alessio. "Computation's Dangerous Idea".

Frei Otto. 2009. "Occupying and Connecting: Thoughts on Territories and Spheres of Influence With Particular Reference to Human Settlement". Edition Axel Menges.

Johnson, Steven. 2001. "Emergence: the connected lives of ants, brains, cities, and software". New York: Scribner.

Jones, Jeff. 2010. "Characteristics of pattern formation and evolution in approximations of physarum transport networks". *Artificial Life*, 16(2), 127-153. <https://doi.org/10.1162/artl.2010.16.2.16202>

Kelly, K., *What Technology Wants*. Viking, New York, USA, 2010.

Picon, Antoine. 2016. "Free the Robots". Anyone Corporation.

Reiser + Umemoto. 2006. "Atlas of Novel Tectonics". Princeton Architectural Press.

Reynolds, Craig. W. 1999. "Steering Behaviors For Autonomous Characters." Sony Computer Entertainment America.

Shiffman, Daniel. 2012. "The Nature of Code". Shaffon Fry.

Snooks, Roland. "Closeness: On the Relationship of Multi-agent Algorithms and Robotic Fabrication".

Snooks, Roland. "Stigmergic Accretion".

Spuybroek, Lars. 2013. "L' architettura del continuo". Delevya Editore

- [1] <https://www.rhino3d.com/download/rhino/6/essential-csharp-scripting-grasshopper>
- [2] <https://icd.uni-stuttgart.de/?p=22773>
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=xdbiN3YcuEI>
- [4] <https://www.youtube.com/watch?v=MXumVxdfbU4>
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/There\\_are\\_known\\_knowns](https://en.wikipedia.org/wiki/There_are_known_knowns)
- [6] <https://www.theguardian.com/commentisfree/2008/jun/28/wildlife.conservation>
- [7] [www.wikipedia.it](http://www.wikipedia.it)
- [8] <https://www.youtube.com/watch?v=VodfQcrXpxc&t=431s>
- [9] <http://spatial-slur.blogspot.com/2013/09/stigmergic-particles.html>
- [10] <https://natureofcode.com/>
- [11] <http://www.rolandsnooks.com/>
- [12] <https://www.kokkugia.com/>





