

HOMEORHETIC ASSEMBLIES:

turning beehive formation dynamics into high-res tectonics

ALMA MATER STUDIORUM-UNIVERSITA' DI BOLOGNA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
DA - DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE / ARCHITETTURA

Tesi di Laurea in Architettura e Composizione Architettonica III
aa -2014/2015

Candidato: Roberto Monesi

Relatore: prof. Alessio Erioli

Corelatore: Paolo Alborghetti



*A Maria, che mi ha amato come un figlio,
ed a tutte le altre persone che ho perso e con cui avrei voluto condividere questo lavoro.*

- 007 _____ abstract

- 009 _____ introduzione
 - 011 __ la natura come esempio
 - 012 __ omeoresi
 - 014 __ i robot in architettura

- 019 _____ premesse logico-scientifiche
 - 021 __ emergence
 - 023 __ i sistemi auto-organizzanti
 - 028 __ stigmergia
 - 030 __ ridondanza ed algoritmo

- 033 _____ role model: i favi naturali
 - 035 __ i favi naturali
 - 036 __ capacità morfogenetiche del materiale
 - 040 __ comportamenti stigmergici
 - 042 __ adattamento ambientale

- 049 _____ processo digitale
 - 051 __ processo di crescita e comportamenti
 - 052 __ caratteristiche fisico-meccaniche
 - 056 __ comportamenti stigmergici
 - 058 __ adattamento ambientale
 - 062 __ ottimizzazione materica
 - 066 __ coesione
 - 068 __ separazione
 - 070 __ parametri fisici

- 073 _____ ricerca tettonica
 - 075 __ esplorazione tettonica
 - 076 __ HA v1.0
 - 078 __ HA v1.1
 - 080 __ HA v2.0/v2.1/v2.2
 - 082 __ HA v3.0
 - 086 __ HA v4.0
 - 094 __ HA v5.0

- 097 _____ applicazione architettonica
 - 099 __ applicazioni
 - 100 __ analisi del contesto e condizioni al contorno
 - 102 __ crescita del sistema
 - 106 __ visualizzazione del progetto

- 114 _____ fabbricazione
 - 117 __ obiettivi della fabbricazione
 - 118 __ le componenti hardware: il braccio robotico
 - 120 __ le componenti hardware: estrusore
 - 122 __ ingegnerizzazione
 - 124 __ simulazione

- 127 _____ conclusioni

- 129 _____ bibliografia

- 133 _____ ringraziamenti

abstract

Questa tesi di ricerca indaga le potenzialità tettoniche ed architettoniche derivanti dallo studio dei sistemi biologici decentralizzati, dei loro comportamenti e delle relazioni dinamiche con la colonia in termini di processi adattativi e costruttivi continui nel tempo.

La ragione di questo interesse è radicata nei principi dell'ecologia applicata al design ed alle tecnologie di fabbricazione contemporanee, che vanno al di là della mera imitazione formale: ci si è quindi chiesto come raggiungere una spazialità complessa ed articolata, omogeneità di prestazioni ed una struttura continua caratterizzata da molti elementi aventi le stesse caratteristiche di forma e materiale. L'ecologia è lo studio di un insieme di economie, ovvero rapporti di scambio, tra un organismo ed il suo ambiente e l'efficienza dei pattern distributivi che derivano da queste relazioni sono fondamentali al fine del successo evolutivo del sistema stesso. I sistemi su cui ci si è concentrati sono caratterizzati dalla capacità di creare strutture a buon mercato (con l'uso di istruzioni semplici ed un unico materiale) e ad elevato grado di complessità ed efficienza, armonizzando l'aspetto formale con l'organizzazione materica e fisiologica.

Il modello di comportamento considerato riguarda le dinamiche alla base della creazione degli alveari naturali creati dalle api millifere. Lo stereotipo dell' *"honeycomb"*, viene spesso mal interpretato e considerato come un vero e proprio intento progettuale, ma in realtà in natura esso è il risultato di un processo complesso di formazione e trasformazione continuo nel tempo.

Tre comportamenti fondamentali sono stati estratti dal modello naturale preso in esame: il comportamento stigmergico (ovvero la comunicazione indiretta tra gli agenti attraverso il deposito di tracce nell'ambiente), l'auto-stabilizzazione strutturale (indotta dall'organizzazione materica e dal suo comportamento sotto stress) e la capacità adattativa nei confronti del contesto e delle sue variazioni durante il processo di crescita. Queste caratteristiche sono state codificate nella programmazione di un sistema multi agente composto da agenti autonomi in grado di interagire in un ambiente eterogeneo (composto da campi vettoriali e scalari) e capaci di depositare selettivamente elementi in una struttura composta da springs e particles, periodicamente stabilizzata (simulando le caratteristiche del materiale) ed ottimizzata (attraverso una continua verifica dell'effettiva utilità dei singoli elementi).

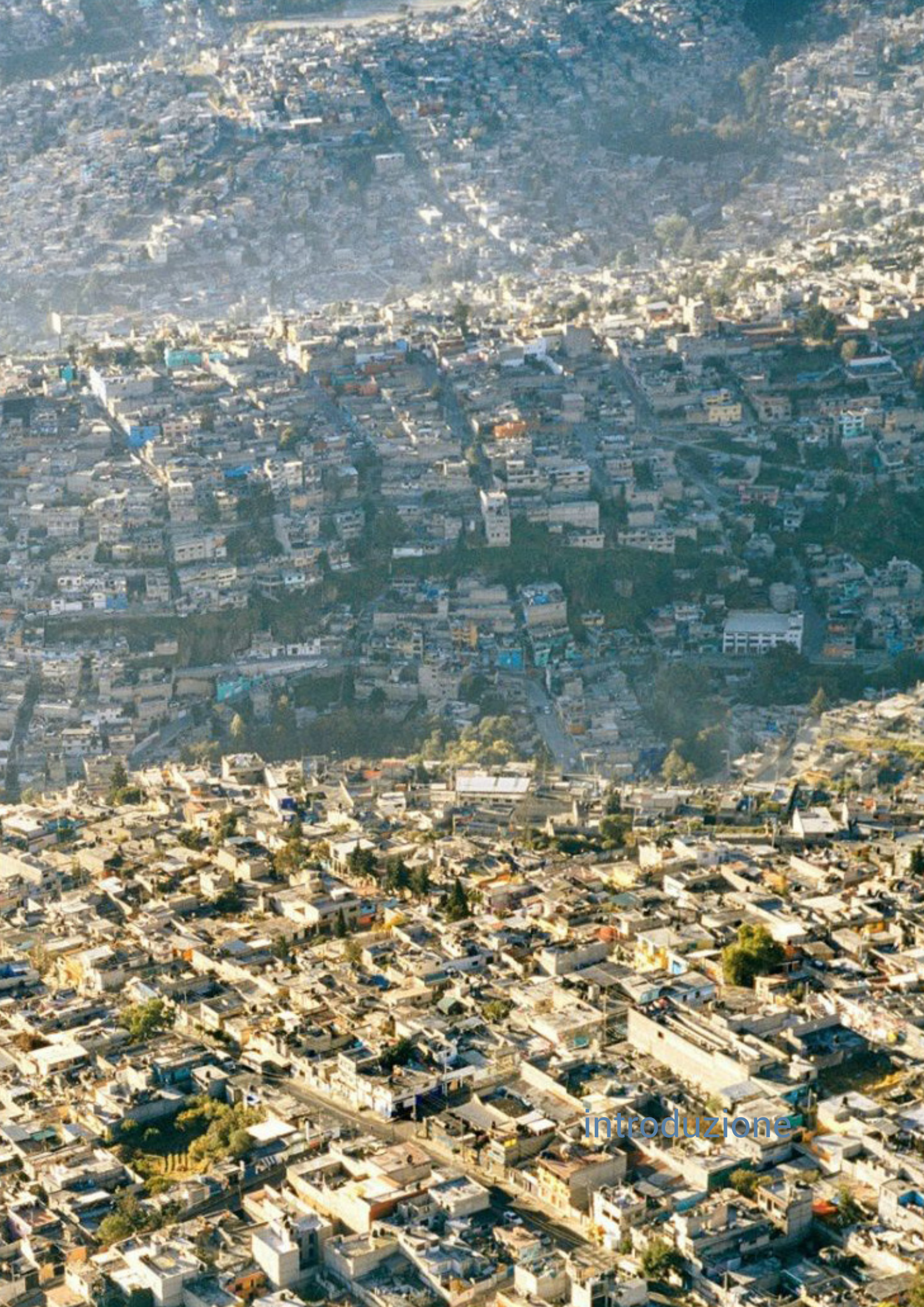
In un tale sistema, a priori sono note solo le relazioni locali per i singoli agenti ed il comportamento strutturale generale, mentre gli oggetti e gli eventi emergono in maniera non predeterminata come risultato di queste interazioni nello spazio e nel tempo.

I risultati appaiono estremamente complessi ed eterogenei nella loro organizzazione spaziale, pur emergendo un set di elementi identificabili nella loro specifica singolarità (come ad esempio superfici, colonne, capriate etc...) ma che generano strutture continue, e creano grande differenziazione di densità e di disposizione dei singoli elementi all'interno della struttura.

La ridondanza strutturale ottenuta è una scelta deliberata e permessa dall'automatizzazione della fase di costruzione attraverso la programmazione di robot, tramite i quali si intende realizzare un prototipo fisico delle strutture ottenute. Attraverso l'utilizzo di un braccio robotico a 6 assi (per il quale si creerà un apposito estrusore per ABS e PLA) si intende infatti sfruttare algoritmi di cinematica inversa per la ricostruzione del materiale depositato, ottimizzandolo per la fabbricazione ma senza intaccare la complessità e la qualità del risultato emergente dal processo studiato.



Mexico city



introduzione

"What we have to learn from nature is to understand its technology."

R. Armstrong

LA NATURA COME ESEMPIO

Da anni ormai la natura è fonte di ispirazione per l'arte. Pittura, scultura, poesia ed architettura hanno negli anni cercato di capire e comprendere fenomeni naturali di ogni scala e dimensione, per sfruttarli come concept, oppure per imitarli o riproporli sotto nuove forme. Troppo spesso però, soprattutto per ciò che riguarda l'architettura ed il design in generale, si è solo grattato la superficie, fermandosi ad una ricerca più di forma che di contenuti.

Negli anni '70 Frei Otto, attraverso le pubblicazioni della sua fondazione, portava alla luce il forte legame di interdipendenza tra architettura e biologia per la formazione di un ambiente diverso da quello a cui si era abituati a pensare.

"Le alterate condizioni ambientali odierne non possono ormai essere dominate con le risorse architettoniche del passato[...]. Il rapporto tra biologia e progettazione necessita oggi di una chiarificazione dovuta ad esigenze pratiche e reali. Il problema dell'ambiente non è mai stato una sfida così grande all'esistenza. In effetti si tratta di un problema biologico[...]. Non solo la biologia diventa indispensabile per la progettazione ma la progettazione per la biologia"¹.

Ad oggi, grazie alle conoscenze ed agli strumenti accumulati e condivisi negli anni, questo legame intimo tra biologia ed architettura può essere approfondito e meglio compreso. Per fare ciò conviene però partire da quelli che sono stati risolti fondamentali per quel che riguarda la comprensione dei fenomeni naturali, dei comportamenti degli organismi viventi e della loro evoluzione. Tra questi, spicca, ad esempio, il lavoro di ricerca di Lynn Margulisⁿ¹, tra i più validi e comprovati, che per alcuni aspetti fondamentali supera e completa la teoria evolutiva di Darwin².

La novità sta essenzialmente nel concentrare l'attenzione non più sugli organismi in sé, bensì sulle interazioni tra gli stessi; motore principale dell'evoluzione diventano quindi i rapporti simbiotici tra gli organismi e tra organismi ed ambiente. L'evoluzione non può quindi essere vista come un fenomeno lineare di adattamento, bensì come il risultato di continui scambi, interazioni e modificazioni reciproche.

Ecco quindi che emergono alcune delle caratteristiche fondamentali dei sistemi naturali, da cui questa ricerca vuole prendere spunto. Le interazioni, gli scambi ed i processi con cui essi avvengono sono la vera chiave con cui capire la natura.

_1: Frei Otto (1971).

_N1: Lynn Margulis (1938-2011); biologa statunitense è stata a lungo docente al Dipartimento di Scienza della Terra all'Università del Massachusetts, ad Amherst. È nota soprattutto per la sua teoria sull'origine degli organuli eucarioti, ora generalmente accettata come spiegazione alla formazione dei mitocondri.

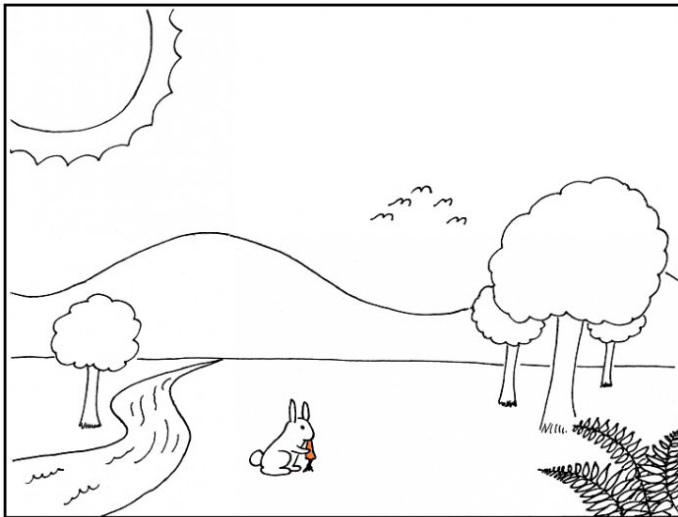
_2: Charles Robert Darwin (1809-1882).

OMEORESIS

Spesso molti sistemi biologici sono erroneamente descritti come omeostatici. In natura però (in accordo coi fondamentali principi termodinamici) per organismi ed ecosistemi non può essere raggiunta una condizione di equilibrio assoluto perchè essi si trovano ad interagire in un ambiente aperto (e che quindi permette continui scambi di energia e materia con l'esterno).

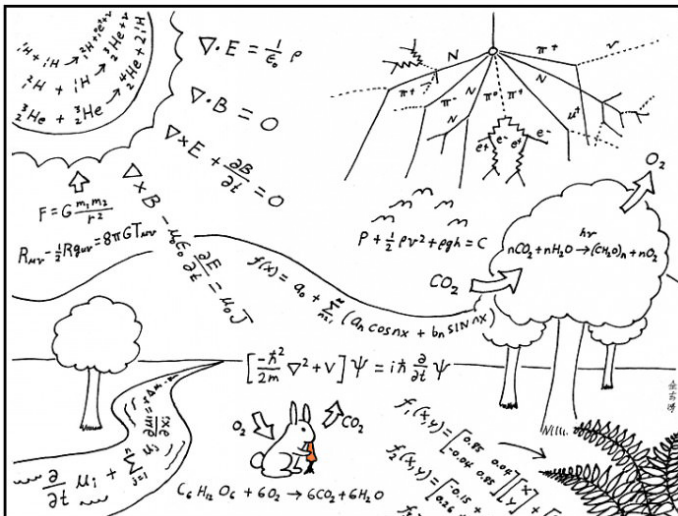
Nel 1940 durante una lezione all'università di New York il Dr. William Butts per meglio definire i sistemi biologici ed il loro comportamento li descrive come sistemi omeoretici, ovvero come sistemi che evolvono e mutano attraverso processi dinamici che tendono a stati di stabilità di grado crescente¹. Il concetto di omeoresi quindi riconduce ad un'idea di processo che tende continuamente allo sviluppo del proprio potenziale, attraverso il mantenimento di una traiettoria evolutiva.

¹<https://en.wikipedia.org/wiki/Homeorhesis>



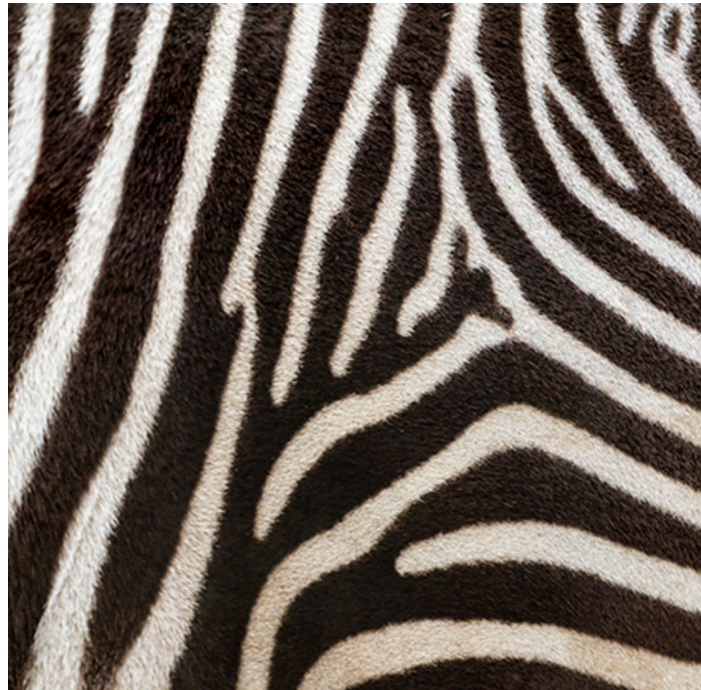
_F1: vignetta tratta da da "come gli scienziati vedono il mondo".

Questa immagine è emblematica di quello che è il vero significato della natura. Da un punto di vista scientifico infatti, può essere vista come un insieme di scambi di materia e di energia, di interazioni e di legami, che possono essere compresi, studiati e codificati. Lo studio della natura deve quindi essere affrontato da un punto di vista dell'ecologia, ovvero dello studio di un set di economie (relazioni di scambio) tra un organismo ed il suo ambiente, dalle quali emergono pattern distributivi la cui efficienza è fondamentale per la sopravvivenza del sistema.



_F2: <http://www.psmag.com/nature-and-technology/alan-turing-enigma-code-zebra-got-stripes-leopard-spots-89223>.

Il pattern visibile sul manto della zebra è uno degli esempi più noti di come le forme presenti in natura, se comprese, possano essere lette per quello che sono, ovvero risultati di processi basati su codici ed algoritmi. Questo infatti è uno dei molti esempi in natura in cui è possibile individuare i pattern di Turing, che mostrano la loro natura dinamica variando durante la crescita dell'esemplare, ed essendo differente da esemplare ad esemplare, mostrando come, da un solo genotipo, sia possibile ottenere molte configurazioni fenotipiche diverse.

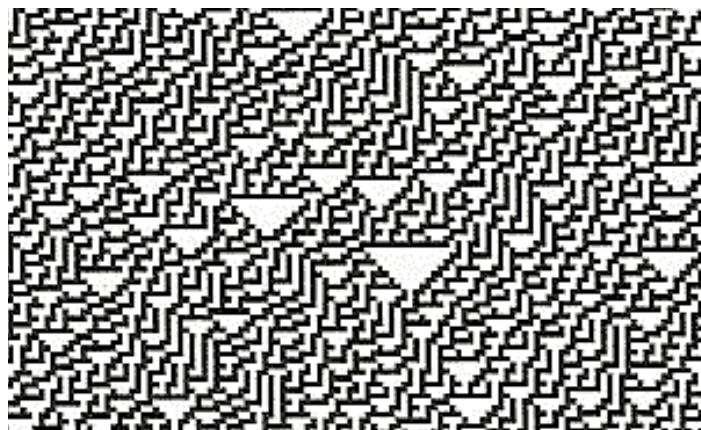


_F3: Photographer: Richard Ling richard@research.canon.com.au.

La conchiglia a fianco, nota come "*Conus Textile*", è un altro tipico esempio del risultato di "*Cellular Automata*" naturale. Le cellule del pigmento si trovano nel sottile strato esterno del guscio. Ogni cellula secerne pigmenti a seconda della attivazione e inibisce l'attività delle cellule vicine. Il pattern di questa specie è molto simile al modello di Wolfram dopo 30 iterazioni.



_F4: Modello di Wolfram ottenuto dopo 30 iterazioni. Questo modello altro non è che una formulazione matematica di un sistema basato su automi cellulari (CA) in cui lo stato di ogni cellula influenza quelle vicine.



I ROBOT IN ARCHITETTURA

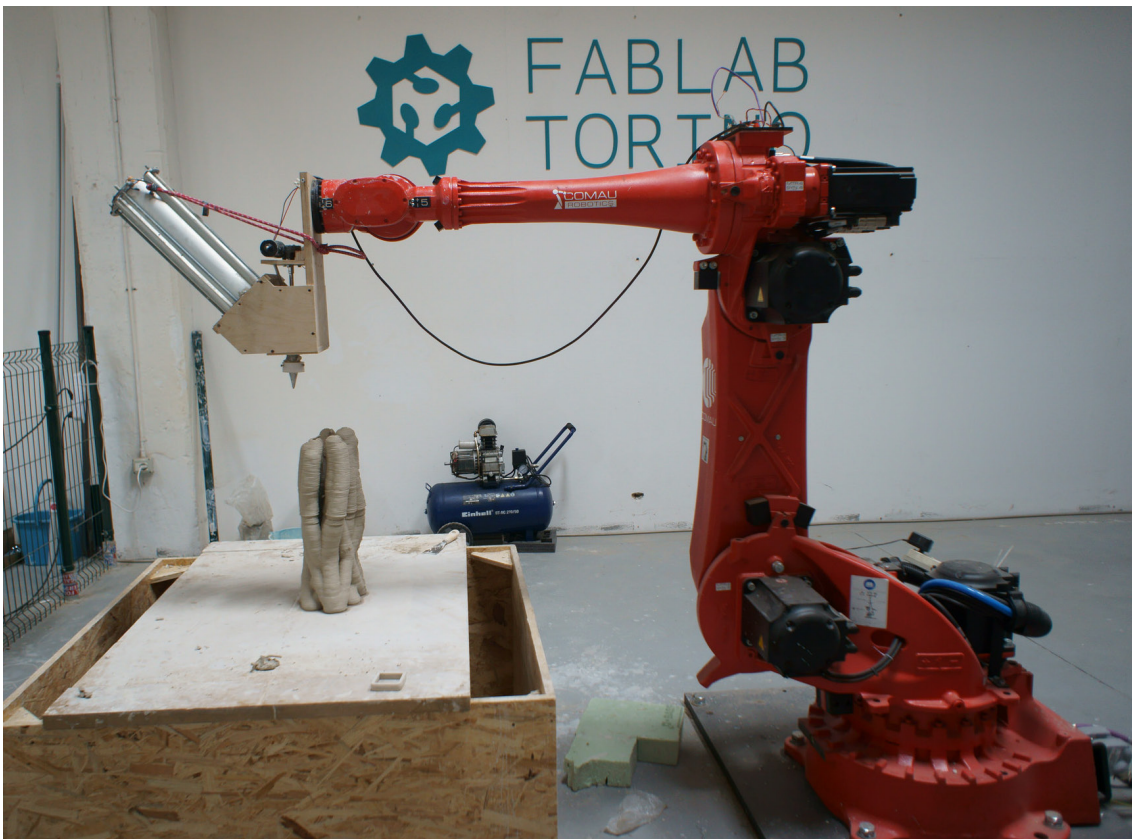
Nell'ultimo periodo si è assistito ad un grande ampliamento dell'impiego dei robot nell'architettura.

I costi delle macchine sempre più contenuti, la forte componente open source di molti progetti software ed hardware, ha dato una notevole spinta verso quello che molti chiamano l'artigianato 2.0. La comunità dei "maker" in continua espansione ha probabilmente accelerato ulteriormente la necessità dell'introduzione di robot di vario tipo per colmare molte delle lacune presenti nel momento della prototipazione di elementi di design realizzati tramite approcci computazionali-generativi. Tali introduzioni non sono state fondamentali solo per superare limiti costruttivi esistenti, ma sono diventati talmente importanti da provocare un vero e proprio cambiamento del pensiero costruttivo.

La prototipazione diventa quindi un fattore fondamentale del processo creativo, che interviene, sotto forma di limite o di potenzialità, non più solamente nella fase finale, ma anche come input e strumento per raggiungere la maturazione del progetto stesso. A testimonianza di ciò è possibile vedere come molti rami della ricerca (con finalità architettoniche e di design) si stiano sviluppando in questa direzione.

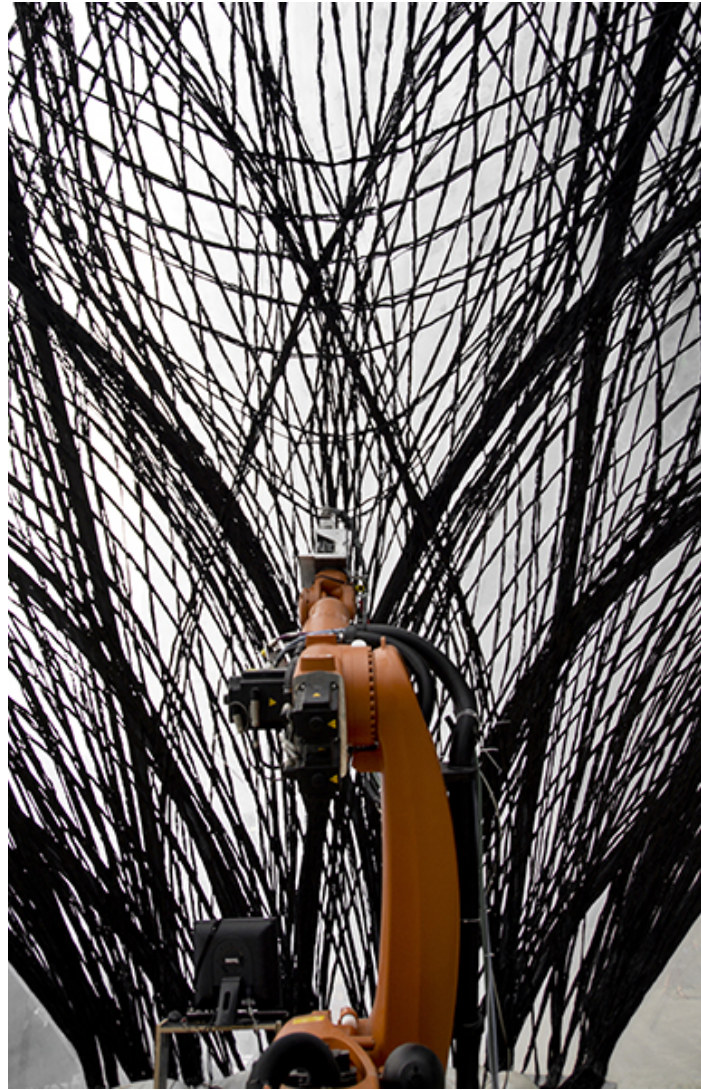
_F1: www.co-de-it.com.

Il filone di ricerca di Co-de-iT denominato "INFORMED MATTER" è dedicato all'esplorazione di processi produttivi attraverso l'incorporazione di informazioni nel processo di fabbricazione come elemento fondamentale nella realizzazione della forma stessa. In questo caso la prototipazione raggiunge un nuovo significato come parte del processo di design, mirata non più alla produzione di copie esatte di un modello digitale ma come un nuovo processo capace di incorporare e sfruttare le caratteristiche di auto-organizzazione della materia come caratteristiche di produzione di forma del materiale stesso.



_F2: <http://icd.uni-stuttgart.de>

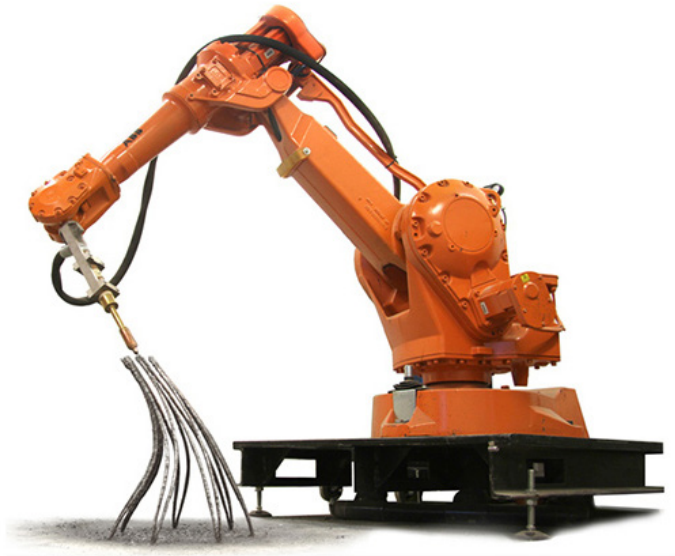
L'ICD / ITKE Research Pavilion 2014-15 dimostra il potenziale architettonico di un padiglione ispirato alla costruzione del nido sottomarino del ragno acqua. Questo padiglione fa parte della serie di prototipi che esplorano le potenzialità applicative di innovativi processi di progettazione, simulazione e fabbricazione. Il padiglione nasce dalla collaborazione interdisciplinare ed internazionale, ed è il risultato di un anno e mezzo di lavoro svolto da ricercatori e studenti di architettura, ingegneria e scienze naturali.



_F3: <http://i-o-a.at>

University of Applied Arts Vienna & University of Innsbruck REXILAB, Robotic Infiltrations. Questa ricerca esplora il potenziale dell'interazione di miscele di materiale specifico (PU espanso, gesso, acqua e indurente) combinati con movimenti precisi gestiti nel tempo al fine di realizzare nodi strutturali.





_F4, F5, F6, F7: www.jorislaarman.com.

Le immagini seguenti sono tratte dal lavoro svolto dal Joris Laarman Lab in collaborazione con l'istituto di Architettura Avanzata della Catalogna (IAAC). Per questa ricerca è stata utilizzata la MX3D-Metal, ovvero una combinazione di una stampante 3D e di una saldatrice in grado di stampare linee di acciaio ed altre leghe, che ha fatto il suo esordio in occasione della Conferenza di Fabbricazione Digitale di Zurigo del 2014. Grazie a questo dispositivo sono state prodotte superfici 3D estremamente complesse e snelle. In particolare in fase di progettazione si è pensato ad un ponte che potesse essere realizzato da due robot lavoranti in parallelo (render a destra). In questo caso la forma del ponte nasce direttamente dall'analisi degli sforzi al fine di ottimizzarne la staticità, ed i robot non solo dovrebbero realizzare la struttura, ma anche i binari lungo cui si devono muovere durante il processo realizzativo.







<http://www.scubadiving.com/diving-with-schools-barracuda?image=0>



premesse
logico-scientifiche

"[In] evolutionary processes, causation is iterative: effects are also causes. And this is equally true of the synergistic effects produced by emergent systems. In other words, emergence itself... has been the underlying cause of the evolution of emergent phenomena in biological evolution; it is the synergies produced by organized systems that are the key. "

P.Corning

EMERGENCE

_1: S.JOHNSON, "Emergence", scribner, 2001.

Il termine "emergence" assume un ruolo fondamentale non solo per la comprensione dei sistemi biologici, ma anche per capire l'evoluzione e lo sviluppo di interi sistemi sociali, economici e culturali.

Nel 2001 Steven Johnson pubblicava il libro intitolato per l'appunto, *Emergence*¹. Qui l'autore propone un vero e proprio percorso allo scopo di ricercare il significato della parola emergenza e di capire al meglio il funzionamento dei sistemi auto-organizzanti. A tale scopo spiega le relazioni e le similitudini esistenti tra sistemi che, se guardati in maniera superficiale, non potrebbero sembrare più distanti, ma il viaggio attraverso lo studio delle colonie delle formiche, lo sviluppo delle città, il web ed il cervello umano (inteso come reti neurali) dà la possibilità di definire il significato di questa parola.

L'emergenza può essere definita come il processo di formazione di schemi complessi a partire da regole più semplici. I comportamenti emergenti si manifestano quindi, quando un sistema composto da molti elementi esibisce proprietà non prevedibili tramite la sola conoscenza delle regole di base che governano i singoli componenti. Essi scaturiscono quindi da interazioni non-lineari.

Una proprietà emergente può comparire quando un elevato numero di entità semplici, caratterizzate da regole comportamentali (agenti) operano in un ambiente, dando origine a comportamenti più complessi in quanto collettività. Questa proprietà non è predicibile e non ha precedenti, e rappresenta un nuovo livello di evoluzione del sistema. Questi comportamenti non sono quindi proprietà delle singole entità e non possono essere facilmente dedotti dai comportamenti di entità del livello più basso.

Le strutture emergenti sono quindi schemi non creati da un singolo evento o da una regola. Non c'è niente che ordini al sistema di formare uno schema, ma le interazioni di ogni parte con il suo intorno causano un processo complesso che porta ad un aumento del grado di complessità.

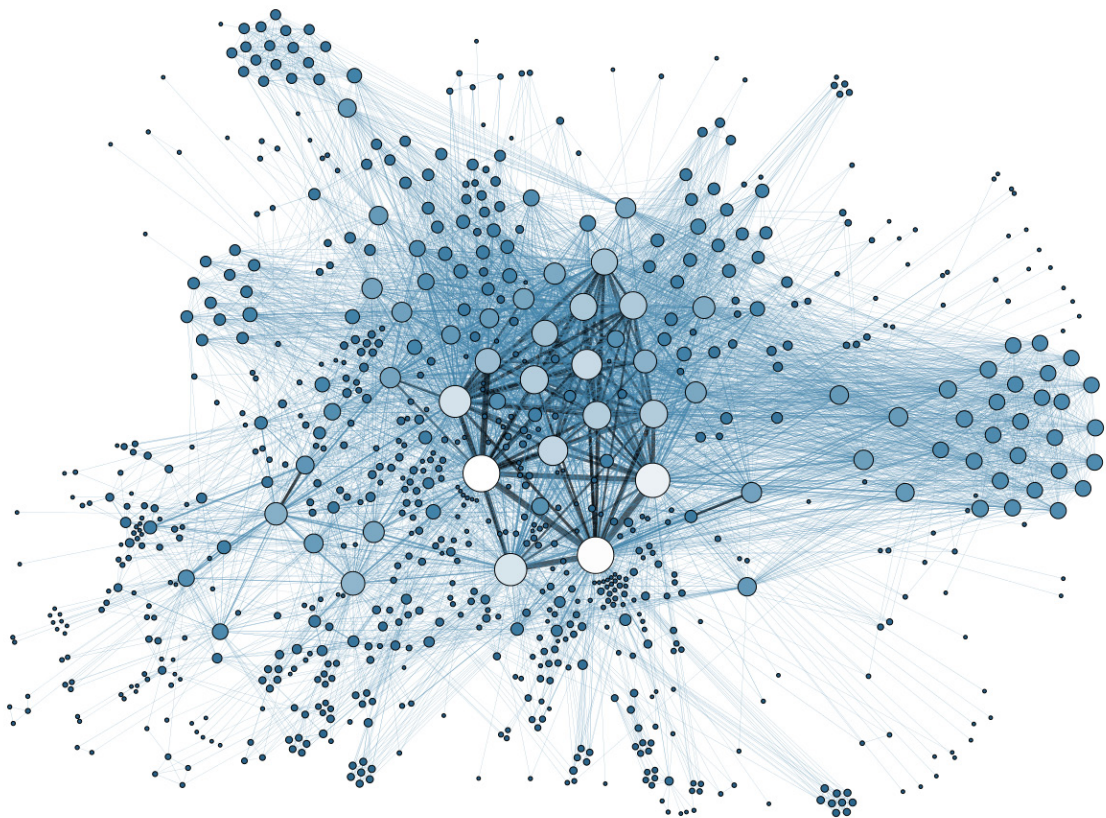
Si potrebbe concludere che le strutture emergenti sono più della somma delle loro parti, perché l'ordine emergente non si formerà se le varie parti coesistono solamente: è infatti necessaria la loro interazione².

²: https://it.wikipedia.org/wiki/Comportamento_emergente

^{F1}: https://en.wikipedia.org/wiki/Network_theory

Grandjean, Martin (2014). "La connaissance est un réseau"; visualization of social network analysis.

Internet ed in modo particolare le connessioni fra utenti (nel caso specifico connessioni tramite social networks) sono un esempio tipico di sistema emergente. Elemento fondamentale di queste reti sono infatti i feedback ed il rating dato dagli utenti. lo stesso Johnson porta come uno dei primi esempi di interattività web *Slashdot*, raccoglitore di news basato sul rating degli utenti (1997). In questo caso quindi gli agenti sono gli utenti stessi, che come possibilità comportamentale avevano la possibilità di valutazione (tramite apprezzamento o meno) dei post pubblicati. Funzionamento simile hanno anche quelli che ad oggi sono i social networks più diffusi. Feedback (volontari e non) e rating sono le semplici regole a cui l'utenza risponde.



I SISTEMI AUTO-ORGANIZZANTI

_1: <https://it.wikipedia.org/wiki/Auto-organizzazione>

_N1: Le self-organizing map (SOM) sono una fattispecie di organizzazione di processi di informazione in rete analoghi alle reti neurali artificiali.

Il concetto di sistema auto-organizzante è profondamente legato al concetto già visto di emergenza.

Nella teoria dei sistemi, l'auto-organizzazione è principalmente una forma di sviluppo del sistema attraverso semplici regole a cui gli elementi che lo compongono devono rispondere, e che permette di raggiungere un maggior livello di complessità¹. Questo concetto riveste notevole importanza pratica in molti ambiti disciplinari, interessando ad esempio le scienze naturali, quelle umane ed anche la cibernetica, in cui trova una applicazione pratica nella "Self-Organized Map"^{N1}.

Di regola i sistemi auto-organizzati possiedono alcune caratteristiche fondamentali quali:

_Complessità: ovvero le parti sono connesse tra loro tramite relazioni mutuali in perenne cambiamento. Ciò rende difficile la descrizione e la previsione del comportamento.

_Interazione adattativa: ovvero gli agenti interagiscono tra loro modificando le rispettive strategie in base all'esperienza accumulata.

_Ridondanza: ovvero un numero di relazioni maggiore di quello strettamente necessario.

Lo studio gli approfondimenti e le ricerche sulla complessità derivante da questi concetti hanno portato ad una differenziazione tra due sotto-sistemi.

Il primo è lo studio dei CPS (complex physical systems), e solitamente si concentra su matrici geometriche regolari (in due, tre o quattro dimensioni), in cui le interazioni tra elementi dipendono esclusivamente da rapporti di prossimità. Esempio fondamentale dei CPS sono i cellular automata, in cui ogni cella risponde a determinate regole comuni tra tutte, ed il cui stato è influenzato solamente dallo stato delle celle vicine.

Il secondo è lo studio dei CAS (complex adaptive systems), in cui si studiano elementi che anche in questo caso sottostanno a poche semplici regole ma che sono in grado di muoversi e più in generale compiere azioni nello spazio. Questi soggetti, chiamati agenti, sono alla base delle simulazioni eseguite su sistemi auto-organizzanti. Nei CAS è solitamente improbabile assistere a forme anche parziali di convergenza verso una situazione di equilibrio, infatti ogni volta che gli agenti si adattano vicendevolmente tendono a comparirne altri, che

provocano nuove interazioni, nuovi feedback e che quindi aumentano ulteriormente il grado di complessità. Nei CAS quindi la natura adattativa degli agenti rende tali sistemi più complessi e difficili da leggere, ed è per questo motivo che, per programmarli, si rende necessario un preciso linguaggio che ne descriva le interazioni.

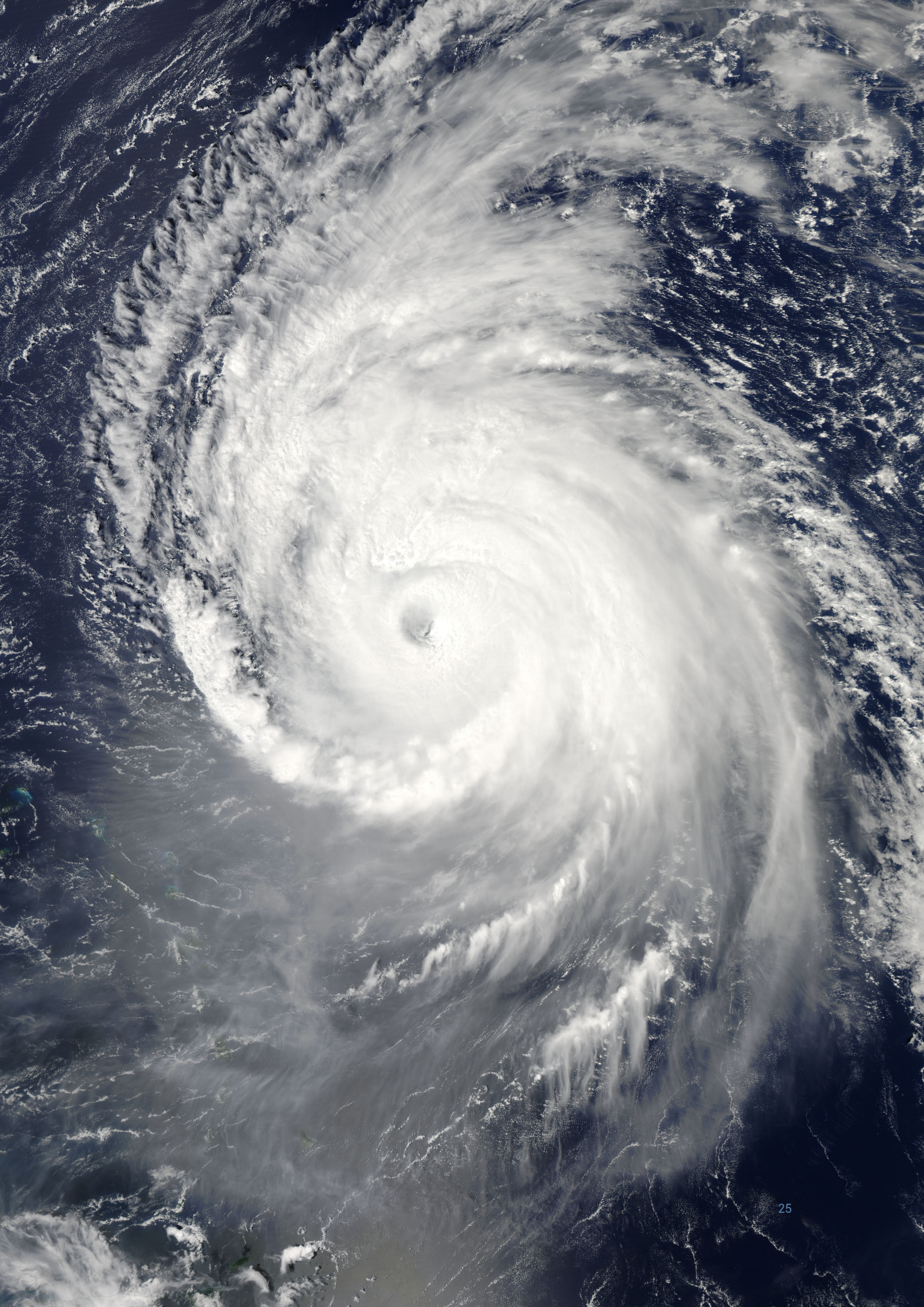
_F1: *Uragano Igor* da www.esa.int.(a lato).

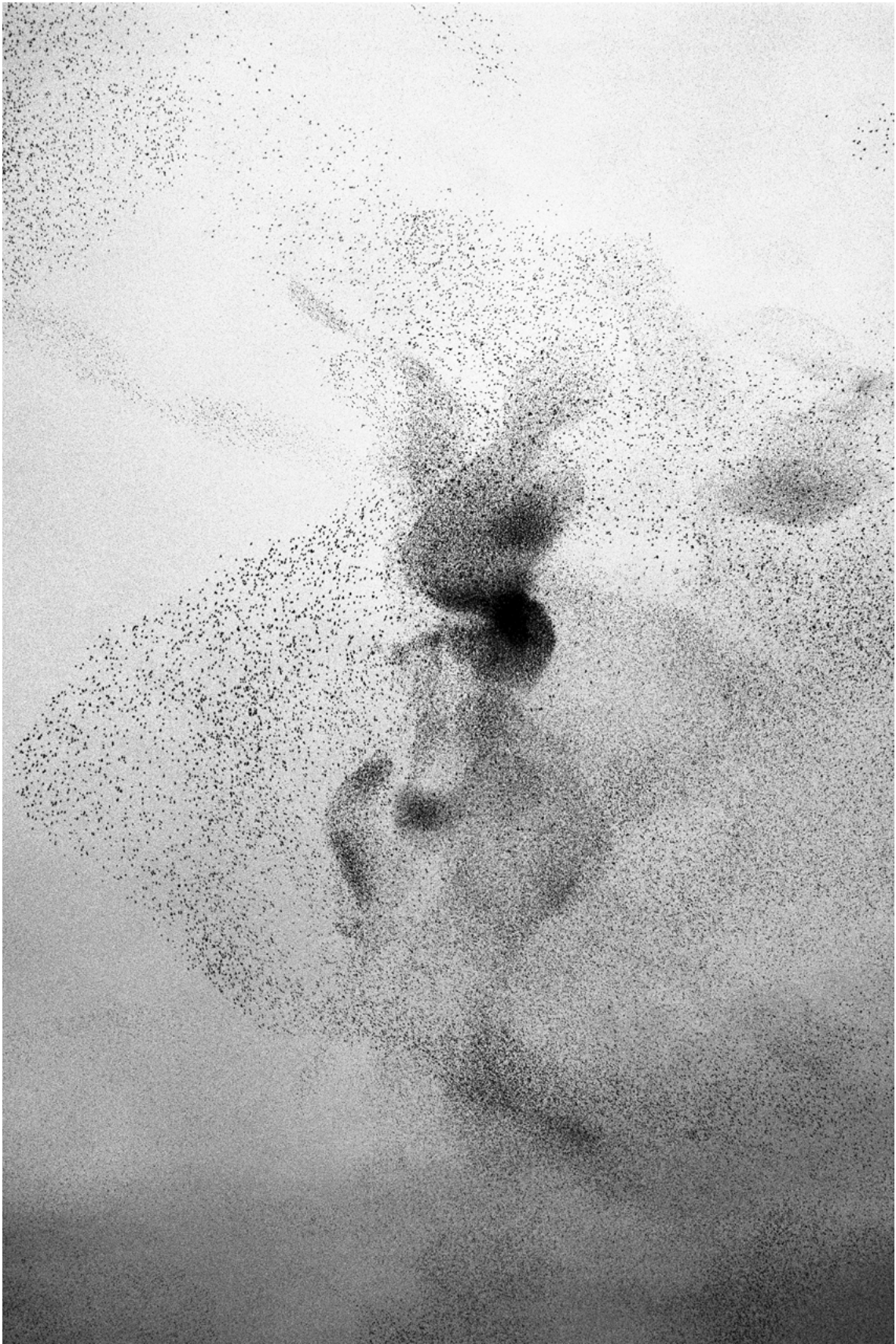
Gli uragani nascono dai feedback positivi scambiati dai flussi dei venti, dai gradienti di umidità, dall'effetto di Coriolis e dalla evaporazione delle superfici oceaniche.

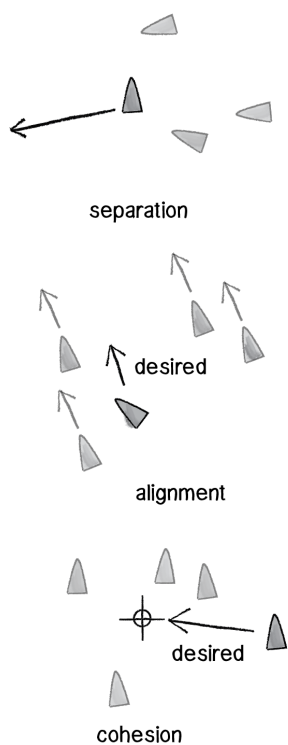
_F2: *"Sand Dune"* di Ansel Adams.(sotto)

Le dune sabbiose ed il loro tipico pattern sono un tipico esempio di sistema emergente, derivante dall'interazione tra gli elementi che compongono il sistema (granelli di sabbia) e l'ambiente stesso (nel caso specifico il vento). Quando la superficie è piatta le particelle spostate dal vento tendono a distribuirsi senza formare pattern particolari. Ma appena appena si generano delle interferenze (spesso date dagli stessi accumuli sabbiosi) vengono a crearsi zone di preferenza per il posizionamento particellare. A sua volta quindi ogni nuovo deposito diventa un ulteriore ostacolo per il successivo. E' per questo motivo che l'aspetto formale risultante (non prevedibile) è strettamente connesso alla direzione ed alla variazione dei venti principali.









_F3: "Murmuration #5" di Paolo Patrizi. (pagina a fianco).

Tipico esempio di sistema emergente è quella che viene definita "swarm intelligence" (ovvero l'intelligenza di sciame). In natura questo tipo di intelligenza è facilmente individuabile in tutti gli animali "sociali", ovvero in stormi di uccelli, banchi di pesci, sciami di api, colonie di insetti etc...

Secondo la definizione di Beni e Watt la "swarm intelligence" può essere definita come: "Proprietà di un sistema in cui il comportamento collettivo di agenti (non sofisticati) che interagiscono localmente con l'ambiente produce l'emergere di pattern funzionali globali nel sistema".

Le caratteristiche fondamentali di questi sistemi sono:

- ogni individuo dispone di "capacità limitate";
- nessun individuo conosce lo stato globale del sistema;
- assenza di un ente coordinatore, o di un "progetto" studiato a priori.

Nel 1986 Craig Reynolds realizza "Boids" un software di intelligenza artificiale creato allo scopo di simulare il comportamento della "swarm intelligence".

_F4: "Reynold's boids law" da <http://natureofcode.com>. (a lato).

I comportamenti basilari dei boids di Reynold sono essenzialmente tre; con la *separazione* il boid si allontana dagli altri per evitare il sovraffollamento locale, con l'*allineamento* sterza al fine di allinearsi con le traiettorie dei vicini ed infine grazie alla *coesione* esso tende ad avvicinarsi al baricentro dei boids vicini.

_F5: "Flocking simulation" dallo script di Kyle McDonald in processing (sotto). Esempio di simulazione di "swarm intelligence" realizzato tramite codice.



STIGMERGIA

Letteralmente, per stigmergia si intende una forma di comunicazione indiretta¹. E' tipico dei sistemi decentralizzati, nei quali gli individui del sistema comunicano tra loro non direttamente ma modificando l'ambiente in cui essi si trovano. La stigmergia è stata inizialmente osservata in natura, dove alcuni degli esempi più noti sono le formiche oppure il sistema costruttivo usato dalle termiti per i loro nidi. La stigmergia è riconoscibile ed individuabile anche su internet, dove gli utilizzatori comunicano l'uno con l'altro tramite tracce (ad esempio messaggi) lasciati in un ambiente condiviso.

Gli esempi di fenomeni stigmergici sono però tantissimi come ad esempio i più comuni comportamenti cellulari, oppure le reti neurali e perfino la computazione, che basa le sue memorie (ad esempio la RAM) su strutture stigmergiche².

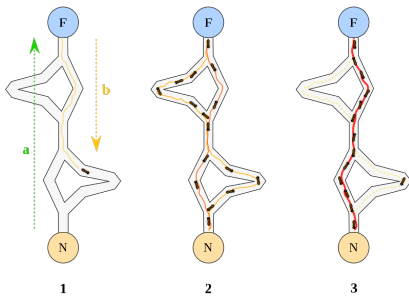
1: [www.treccani.it/enciclopedia/stigmergia\(Lessico-del-XXI-Secolo\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/stigmergia_(Lessico-del-XXI-Secolo)/)

_2: <https://it.wikipedia.org/wiki/Stigmergia>



_F1: "Cathedral Termite Mound" by Bradley Pitt.

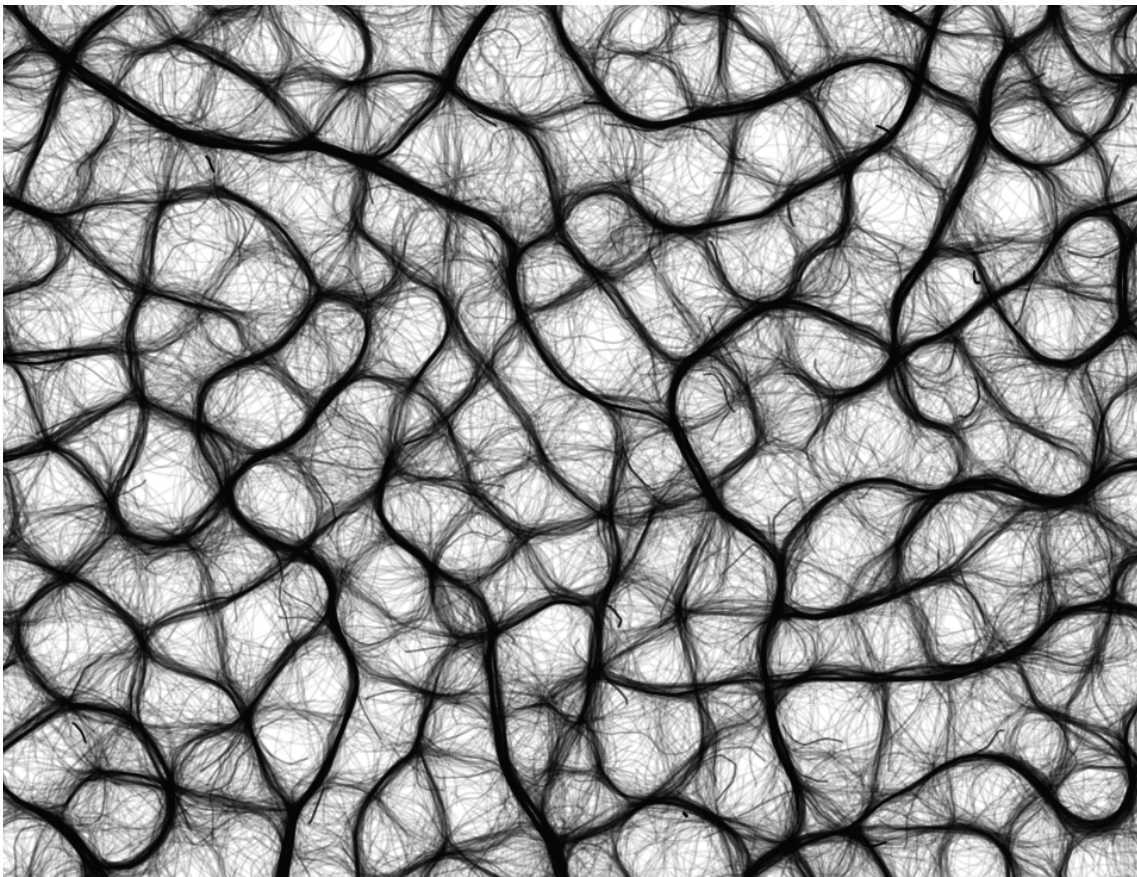
Tipico esempio di stigmergia in natura ovvero la costruzione dei nidi delle termiti. Anche le formiche, così come le termiti, usano i ferormoni grazie ai quali costruiscono strutture molto complesse pur seguendo un semplice insieme di regole decentralizzato. Ogni insetto scava una pallina di fango dal suo ambiente, la copre di ferormoni dopodiché la lascia sul terreno. Le termiti sono attratte dai ferormoni degli individui dello stesso termitaio e quindi depositano le loro palline di fango vicine a quelle già depositate. Con il tempo questo comportamento, insieme alla capacità degli insetti di percepire variazioni di temperatura ed umidità, porta alla costruzione di strutture estremamente varie ed articolate, che si possono diffondere sia in orizzontale, sia in verticale (come nella foto a fianco), raggiungendo altezze anche elevate. Le termiti però non hanno idea della morfologia complessiva e della particolarità del risultato ottenuto né tantomeno hanno idea di come costruire il nido nella sua complessità. Sono quindi guidate solamente da comportamenti basilari e da interazioni locali.



_F2: "Scelta del cammino più breve nella colonia di formiche" autore *Johann Dréo*.
 Altro tipico esempio stigmergico; ogni formica deposita sul terreno mentre cammina feromoni. Per ogni formica quindi il percorso da seguire per la ricerca del cibo sarà guidata dall'intensità dei feromoni già depositati. Dato però che il feromone evapora nel tempo rimarranno marcati solamente i percorsi utilizzati più frequentemente. Grazie a queste interazioni si arriva presto alla scoperta di un percorso ottimizzato, che generalmente coincide con il più breve.

Al fine di comprendere al meglio il significato ed i possibili risvolti legati al concetto della stigmergia, è necessario fare chiarezza sulla differenza esistente tra i concetti di segnale e traccia. Per segnale si intende infatti un evento comunicativo emesso e ricevuto in tempo reale. Sono ad esempio segnali quelli scambiati ed elaborati dai boids nel modello di Reynolds già visto in precedenza. Quando si parla di stigmergia si intende invece che la comunicazione avvenga tramite tracce ambientali. Con il termine traccia infatti ci si riferisce ad una informazione che perdura per un determinato tempo (fino alla sua cancellazione o sovrascrittura), e che quindi può essere riletta più volte. Le tracce quindi rispetto ai segnali posseggono un grado di specificità maggiore trattandosi di informazioni localizzate che definiscono significati diversi in base alla loro posizione nello spazio tempo. Bisogna infatti anche considerare che, come sempre accade in natura, le tracce durante la loro "vita" tendano a variare di intensità fino a sparire completamente (i feromoni lasciati dalle formiche tendono ad esempio ad evaporare col tempo).

_F3: "Agents with pheromone" di *Paolo Alborghetti in processing* (<http://radical-reaction-ad.blogspot.it>). (sotto).
 Esempio di agents a comportamento stigmergico. A differenza dei "boids system" si assiste ad una concentrazione degli elementi la dove è maggiore la concentrazione pherormonica.



RIDONDANZA ED ALGORITMO

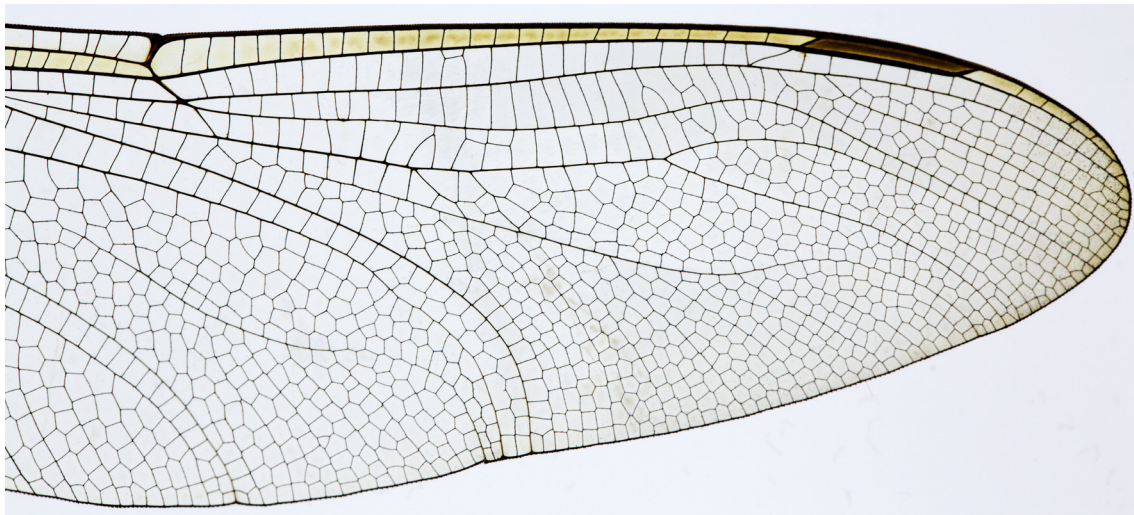
Si può affermare che i processi (di ogni genere) sono basati su codici ed algoritmi; il concetto di natura non è tanto nella sostanza delle cose quanto nell'interrelazione stabilita tra i vari elementi. Questa rete di relazioni è la struttura logica che da forma alle cose in natura, è il codice, mentre i processi sono gli algoritmi basati su quel codice. Processo, codice ed algoritmo sono quindi alla base delle dinamiche morfogenetiche.

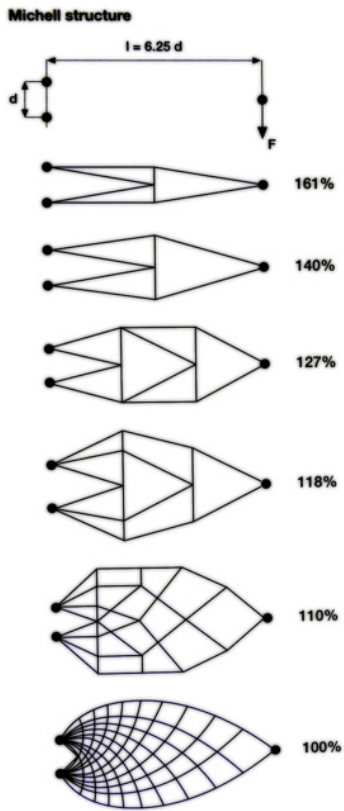
Il secondo concetto invece, è strettamente connesso alla sicurezza del sistema, ed è la ridondanza. Nell'ingegneria dell'affidabilità la ridondanza è definita come l'esistenza di più mezzi per svolgere una determinata funzione, disposti in maniera tale che un guasto nel sistema possa verificarsi solo in caso di guasto contemporaneo di tutti questi mezzi. In pratica quindi, qui, per ridondanza si intende la duplicazione di determinati componenti di un sistema, con l'intenzione di aumentarne l'affidabilità¹. Questa strategia è spesso presente in maniera estremamente efficace nei sistemi naturali, permettendo una miglior risposta a sollecitazioni di natura imprevedibile, con un comportamento complessivo più efficiente grazie proprio all'abbondanza di elementi resistenti.

¹: [https://it.wikipedia.org/wiki/Ridondanza_\(ingegneria\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Ridondanza_(ingegneria))

^{F1}: <https://naturetime.wordpress.com>.

Le ali delle libellule sono un tipico esempio di struttura naturale in cui la complessità formale è data dalla ridondanza strutturale. E' proprio grazie a questa complessità che questi insetti possono sopportare anche sollecitazioni (come correnti aeree) anche molto elevate.



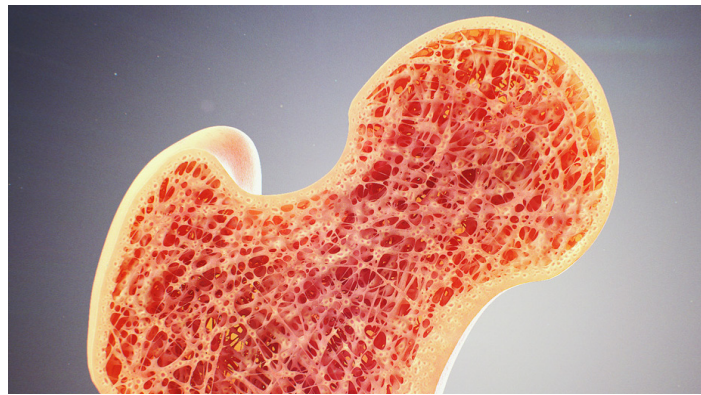


_F2: Image by Adriaan Beukeers.

L'immagine a lato (schema statico a fil di ferro di una struttura a mensola) mostra come un elevato numero di elementi strutturali (opportunamente disposti come ad esempio nello schema più in basso) garantisca un notevole risparmio di materiale (espresso in percentuale del peso totale) rispetto a configurazioni strutturali apparentemente più semplici ma che per garantire le stesse prestazioni richiedono sezioni notevolmente maggiori.

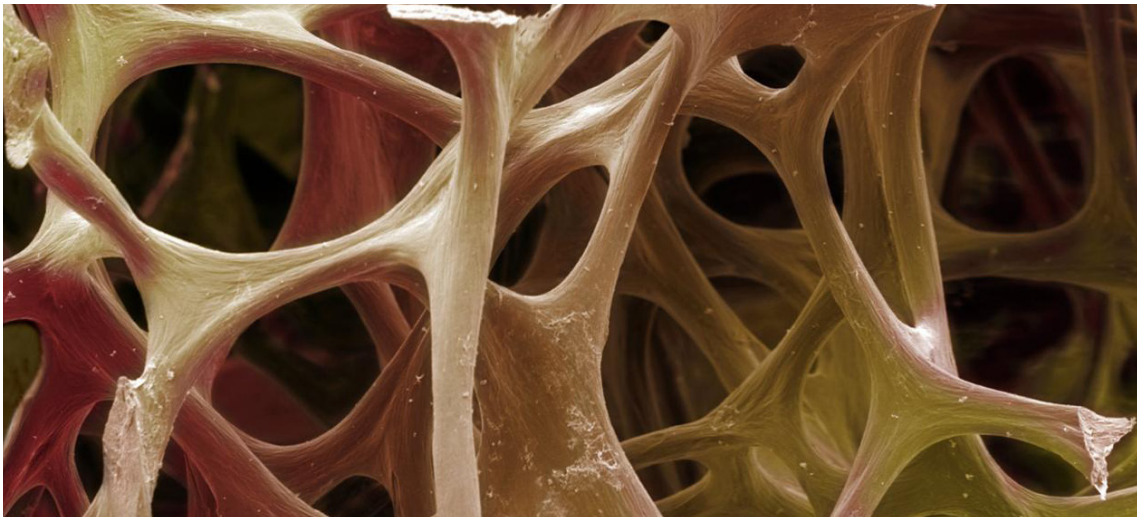
_F3: <http://mrriddick.cgsociety.org>.

Esempio lampante di complessità e ridondanza alla microscala è data dalle ossa umane. Nell'immagine sottostante (riproduzione tridimensione della sezione ossea del femore) è possibile capire come un elemento apparentemente monolitico sia in realtà composto da un reticolo strutturale, che non solo permette una migliore diffusione degli sforzi ed una maggior permeabilità, ma ne aumenta anche esponenzialmente l'affidabilità.



_F4: Science Photo Library, photo by STEVE GSCHEISSNER. (sotto).

Immagine al microscopio del reticolo strutturale che compone l'interno del femore. Risalta subito all'occhio l'estrema complessità e la sovrabbondanza di legami rispetto a quelli immaginabili come indispensabili.







role model:
i favi naturali

"In nature form is cheap and material is expensive"

J.Vincent

I FAVI NATURALI

Quando una famiglia di api lascia l'alveare in cui precedentemente si trovava, obiettivo principale di tutto lo sciame diventa la ricerca e la realizzazione di una nuova dimora. Una volta individuato un luogo che garantisca possibilità di trovare cibo, protezione ed idonee situazioni ambientali per il naturale processo di sviluppo della colonia, inizia la costruzione dei favi naturali.

Il processo che ha inizio rappresenta in tutto e per tutto quello può essere definito come un sistema biologico auto-organizzante¹.

In particolare questa tesi riguarda le dinamiche con cui gli alveari naturali vengono realizzati dalle api millifere e si concentra su tre famiglie comportamentali fondamentali: le capacità morfogenetiche del materiale, i comportamenti stigmergici e la capacità di adattamento ambientale del sistema durante l'intero processo.

¹S. CAMAZINE, J.L.DENEUBORG, N.R. FRANKS, J.SNEYD, G.THERAULAZ, E. BONABEAU, *"Self-Organization in Biological Systems"*, Princeton University Press, 2003.



¹F1: <http://deepseaoflove.tumblr.com>.
A FIANCO: esempio di favo naturale.

CAPACITA' MORFOGENETICHE DEL MATERIALE

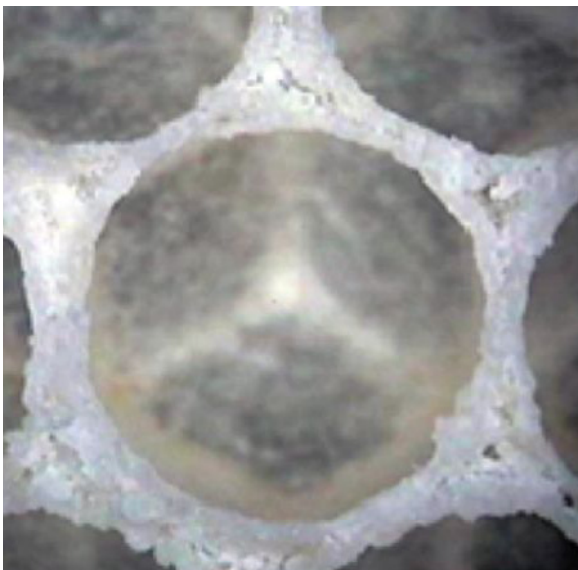
I processi e le interazioni che portano alla realizzazione di un alveare sono molteplici e continui nello spazio e nel tempo. elementi fondamentali per il sistema in esame diventano quindi i suoi parametri fisici, come le capacità morfogenetiche del materiale depositato, le sue caratteristiche meccaniche e le loro variazioni nel tempo.

Nel caso degli alveari delle api millifere in ogni istante del processo di crescita la struttura creata risulta in equilibrio da un punto di vista meccanico-strutturale. Ciò è possibile non solo perchè i sistemi autostabilizzanti promuovono in generale pattern di stabilità¹ ma anche perchè il materiale stesso è in grado di adattarsi (modificando la propria forma) agli sforzi ed alle tensioni a cui è sottoposto. Questa capacità morfogenetica fondamentale venne brillantemente esposta da Tautz nel 2004². In questa pubblicazione viene approfondito e spiegato uno uno degli aspetti formali più noti degli alveari, ovvero il caratteristico pattern composto da celle esagonali, che viene definito come il risultato emergente dell'interazione tra la funzione delle celle, la tecnica utilizzata per la costruzione ed il materiale utilizzato. Nel momento del deposito infatti il materiale si trova allo stato viscoso (per permetterne una migliore lavorazione) e la cella viene costruita sulla base delle dimensioni e della forma del corpo degli insetti lavoratori. Ne risulta quindi un pattern composto da celle cilindriche simili (e non uguali) tra loro (perchè di fatto simili sono le dimensioni delle api operaie). Dagli studi di Tautz emerge poi come, durante il passaggio dallo stato viscoso a quello solido la cera tenda a modificare la sua forma iniziale concentrando gli sforzi lungo le linee di contatto tra i

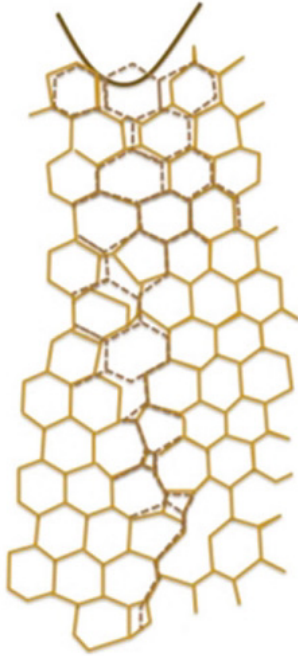
_1: S. CAMAZINE, J.L. DENEUBORG, N.R. FRANKS, J. SNEYD, G. THERAULAZ, E. BONABEAU, "Self-Organization in Biological Systems", Princeton University Press, 2003.

_2: C. W. W. PIRK, H. R. HEPBURN, S.E. RADLOFF, J. TAUTZ, "Honeybee combs: construction through a liquid equilibrium process?", *Naturwissenschaften*, 2004.

_F1: <http://rsif.royalsocietypublishing.org>. Immagini dello stato iniziale realizzato dalle api (a) e del successivo cambiamento dovuto alla forza gravitazionale (b).



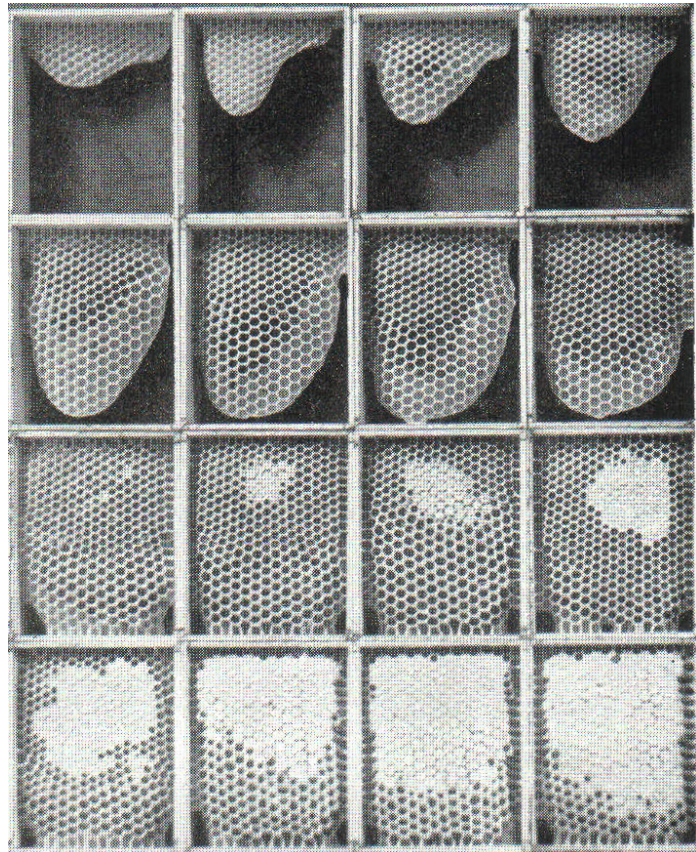
diversi cilindri, facendo così emergere il caratteristico pattern esagonale a "cella d'ape". Questa capacità morfogenetica diventa quindi fondamentale per l'intero sistema, ottimizzando la distribuzione degli sforzi e garantendo grande stabilità a tutta la struttura.



Altra caratteristica fondamentale in termini di capacità meccanica è la continua verifica strutturale che le api eseguono sull'alveare durante tutte le fasi della costruzione. Infatti, ogni qual volta esse rilevano vibrazioni eccessive nei favi realizzano dei collegamenti (bridge) tra favi adiacenti, permettendo una migliore distribuzione dei carichi ed una maggior rigidità.

_F2: B.DARCHEN, R.DARCHEN, "Il fantastico mondo delle api".
A FIANCO: Ricostituzione della continuità strutturale che si rende necessaria quando la struttura già realizzata viene indebolita o danneggiata.

_F3: <http://it.wikipedia.org/wiki/Favo>.
A FIANCO: Fasi del processo di crescita e sviluppo di un favo naturale.
Per quanto riguarda lo sviluppo verticale essendo l'alveare vincolato in sommità in uno o due punti, la struttura si sviluppa verso il basso, con gli angoli inferiori che pendono liberamente verso il basso e si restringono generando la caratteristica forma ad U. Si può osservare come la crescita da pochi punti porti alla completa occupazione dello spazio disponibile per il singolo favo, aumentando via via anche le connessioni e gli appoggi con l'ambiente circostante.





_F4: <http://solarbeez.com/tag/adding-ladders-to-a-warre/>.

A FIANCO: L'immagine è un esempio della complessità strutturale e morfologica generata dal sistema biologico in esame. La ridondanza degli elementi strutturali e le connessioni tra favo e favo (bridge) sono fondamentali ai fini della stabilità del sistema.

_F5: <http://www.milkwood.net>.

SOTTO: La foto sottostante mostra le api durante la creazione ed il riempimento delle celle multifunzionali (riempite con larve o polline).



_F6: <http://dedavisart.com>

SOTTO: L'immagine mostra in un dettaglio un esempio della complessità e della articolazione che gli alveari possono raggiungere in condizioni naturali. E' importante ribadire come lo stereotipo tipico dell'"honeycomb" (ovvero quello che spesso viene definito come il tradizionale e perfetto pattern esagonale a nido d'ape) sia solo un caso particolare, che si genera quando le api possono costruire in aderenza ad una superficie piana ed in condizioni omogenee (in pratica quindi solamente nelle arnie). Spesso questo output viene interpretato come un vero e proprio intento progettuale delle api, ma in realtà Tautz ha dimostrato come questo non sia altro che un risultato emergente dall'interazione di più fattori, tra i quali troviamo le caratteristiche (di composizione forma e stato) del materiale utilizzato e la loro variazione nel tempo (ovvero proprio le sue capacità morfogenetiche).



COMPORAMENTI STIGMERGICI

Camazine (2003) dimostra come il modo in cui le api realizzano i loro alveari naturali possa essere considerato come un sistema biologico auto-organizzato, in cui la struttura risultante emerge dall'attività di molti individui, nessuno dei quali è un leader o è in possesso di piani dettagliati da seguire¹. Nessuna ape è quindi a conoscenza di ciò che verrà realizzato (ovvero del sistema complessivo), ma ha solamente una conoscenza limitata dell'intero sistema e segue semplici regole costruttive (ovvero depositare e modellare la cera). Aspetto fondamentale per comprendere i sistemi auto-organizzanti è capire il modo in cui gli agenti che lo compongono interagiscono tra loro. Su questo argomento Camazine riprende e conferma gli studi pubblicati da Darchen (1994), che attraverso ricerche scientifiche dimostra come la comunicazione tra le api durante il processo costruttivo avvenga per stigmergia. La stigmergia è una forma di comunicazione indiretta tra i membri di una colonia che avviene tramite tracce lasciate nell'ambiente. Le potenzialità di questo tipo di interazione è evidente in molti sistemi biologici (come ad esempio i termiti) e sono state attentamente approfondite anche in ambito computazionale da J.Jones (2009). Per la costruzione degli alveari ogni ape, una volta individuate le aree ottimali per lo sviluppo della colonia, deposita una piccola quantità di cera, in adiacenza alle celle già costruite, che possa essere utilizzata per proseguire la costruzione. E' la stessa cera quindi che fungendo da attrattore per gli altri insetti, indirizza e guida la costruzione, rendendo superflui altri possibili comportamenti come le comunicazioni dirette tra gli insetti stessi. La stigmergia quindi regola le sequenze ed i pattern costruttivi iniziali della struttura, influenzando le traiettorie di volo degli insetti e permettendo un grado di concentrazione materica idoneo allo sviluppo del sistema.

¹:S. CAMAZINE, J.L.DENEUBORG, N.R. FRANKS, J.SNEYD, G.THERAULAZ, E. BONABEAU, *"Self-Organization in Biological Systems"*, Princeton University Press, 2003.

²: R. & B. DARCHEN, *"Il fantastico mondo delle api"*, Piccoli, Torino, 1994.

³: J. JONES, A. ADAMATZKY, *"Programmable reconfiguration of PHYSARUM machines"*, Centre for Unconventional Computing, University of the West of England, Coldharbour Lane, Bristol, 2009.

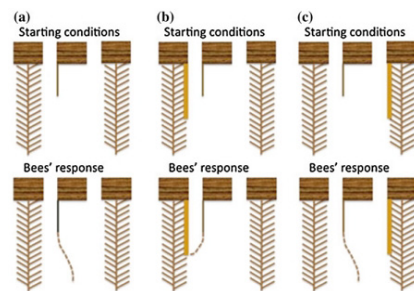
_F1: www.myemail.constantcontact.com.
A FIANCO: Come evidenziato dagli studi di Camazine e Darchen gli alveari naturali sono il risultato di sistemi auto-organizzanti lavoranti per stigmergia. Questo tipo di comunicazione permette di ottenere grande varietà morfologica e capacità adattative nei confronti delle condizioni al contorno in cui il sistema opera.



ADATTAMENTO AMBIENTALE

Proprietà fondamentale dei sistemi auto-organizzanti, e quindi anche degli alveari è la grande capacità di adattamento ambientale. Il sistema biologico studiato, infatti, una volta individuati gli start points per la costruzione è in grado di interagire con l'ambiente e valutarne i parametri fondamentali per lo sviluppo della colonia. Gli studi di Darchen (1994)¹ dimostrano questa grande adattabilità raffrontando il comportamento del sistema rispetto ad alcuni fattori ambientali imprescindibili. Il primo fattore ambientale esaminato sono le temperature. Essendo le api estremamente suscettibili alle variazioni termiche e dato che le larve per svilupparsi hanno bisogno di temperature tra i 30° ed i 35° lo sviluppo dell'alveare avviene attraverso aree a bassissima variazione termica. Sempre a causa della sensibilità degli insetti alle variazioni termiche, come secondo parametro ambientale Darchen studia gli effetti delle correnti aeree. Partendo dal presupposto che gli alveari vengono solitamente realizzati in zone protette e con bassa esposizione ai venti, risulta comunque notevole la loro capacità di adattamento. Quando infatti sono presenti flussi di aria ridotti ma pseudo persistenti la struttura depositata tende a seguirne le direzioni principali. Così facendo quindi le correnti vengono incanalate e ciò permette di ridurre al minimo le variazioni termiche per le larve, ma anche di limitare le sollecitazioni ortogonali sui favi che, data la forma, sarebbero le più pericolose ai fini della stabilità strutturale. Altra caratteristica fondamentale per i sistemi auto-organizzanti che lavorano per stigmergia è la loro capacità di aggirare ostacoli. Nel caso specifico, le api, come dimostrato sempre da Darchen, durante la costruzione degli alveari sono in grado di avvolgere, inglobare o vincolare la struttura ad eventuali ostacoli, trasformandoli così in punti di ancoraggio per l'intera struttura. Questo comportamento consente maggiori possibilità di sviluppo per il sistema aumentandone la stabilità.

_1: R. & B. DARCHEN, "Il fantastico mondo delle api", Piccoli, Torino, 1994.



_F1:B.DARCHEN, R.DARCHEN, "Il fantastico mondo delle api".

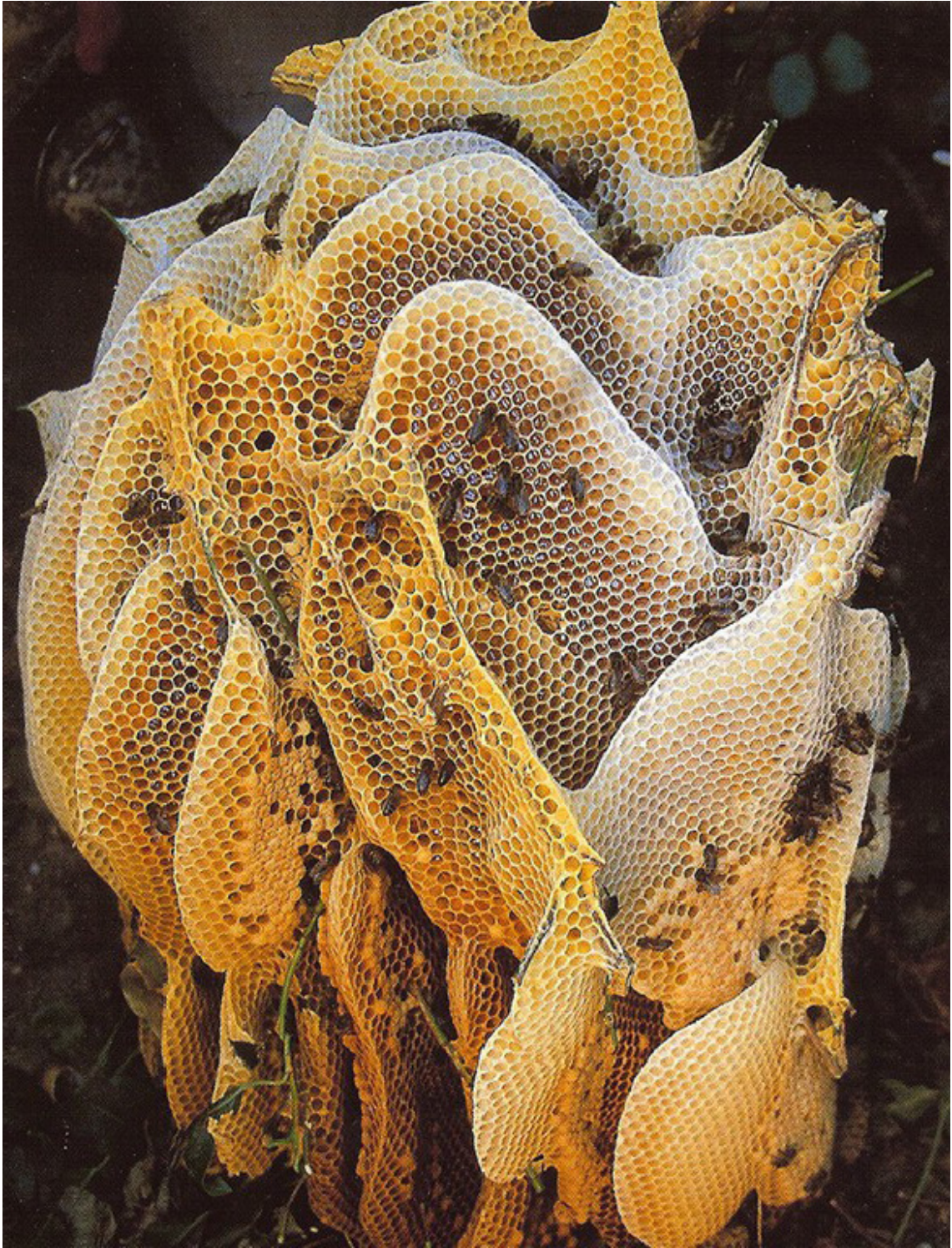
SOPRA: Studio della risposta delle api a diverse condizioni di partenza. Tale studio fu eseguito per comprendere e verificare la risposta ad eventuali ostacoli.

_F2: Geometric beehive sculptures by R.Ri.
A FIANCO: Le grandi capacità adattive degli alveari hanno trovato ampio spazio anche nel mondo dell'arte. In queste serie di opere l'artista non faceva altro che ruotare il poliedro dentro cui erano poste le api ad intervalli di tempo regolari. Gli insetti captando la variazione delle condizioni (in questo caso variazione della verticale) adattavano di volta in volta la struttura, generando forme estremamente articolate.



_F3 e F4: Sculptures wrapped in honeycomb by Aganetha Dyck.
A FIANCO e SOTTO: anche in questo caso l'arte sfrutta il potenziale dei sistemi auto-organizzanti che realizzano strutture avvolgenti ed abiti che aderiscono a strutture o ad opere pre-esistenti.





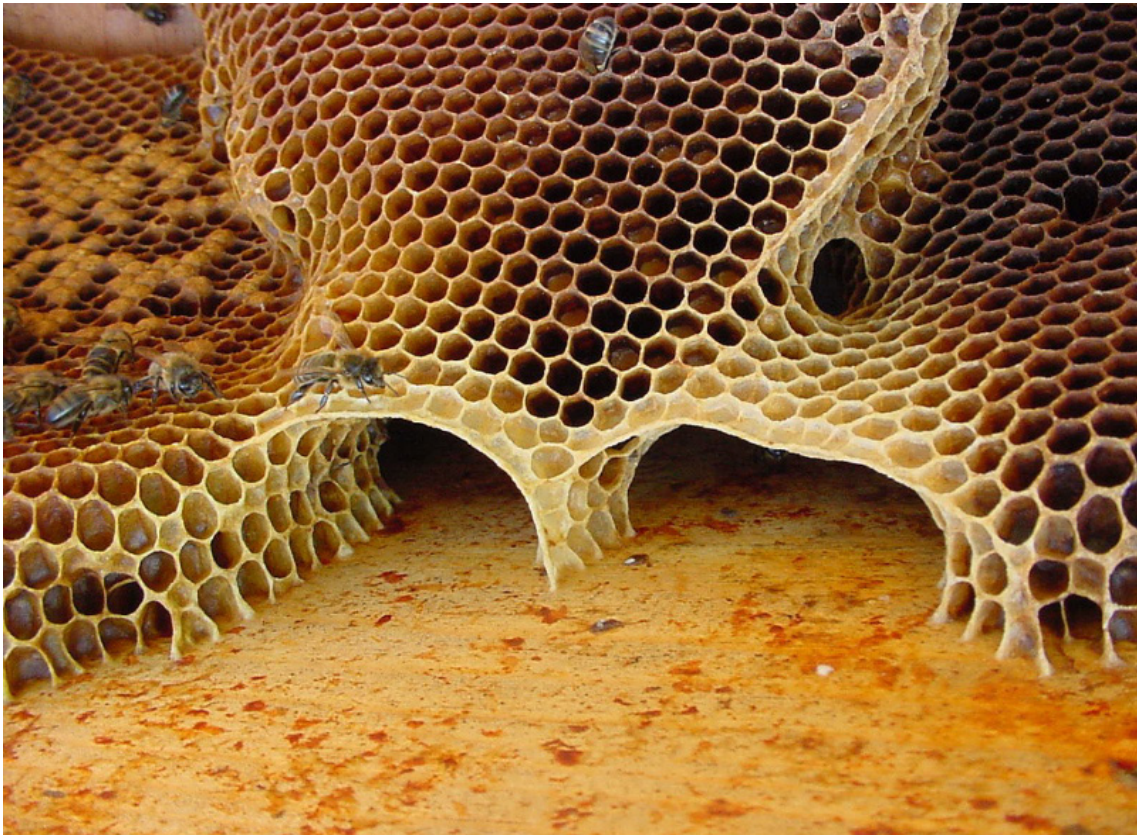
_F5: www.sawattsdesign.com.

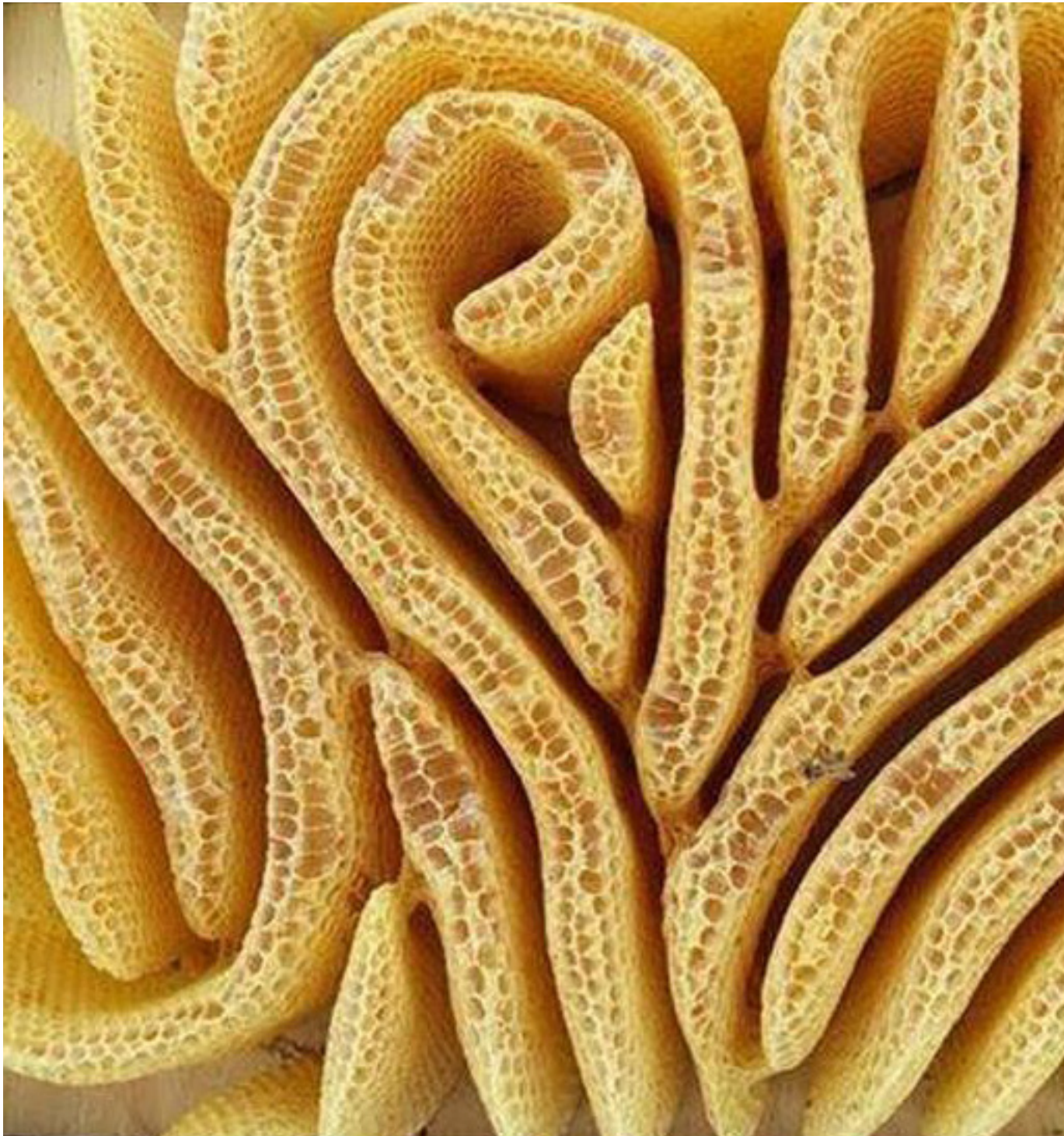
PAGINA A FIANCO: esempio della complessità e dell'articolazione frutto delle semplici regole alla base della creazione dei favi. Si noti come il "folding" sia una caratteristica fondamentale al fine della resistenza per forma dell'intera struttura e di ogni sua singola parte.

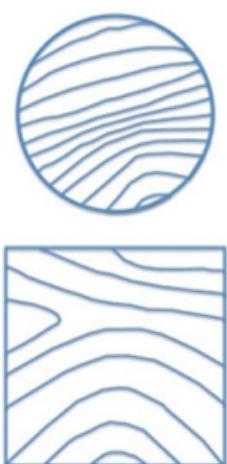
Inoltre, la continuità degli spazi vuoti e l'alternarsi con i pieni che emerge dal processo già descritto è la sintesi della funzionalità necessaria affinché l'alveare possa rispondere nel miglior modo possibile al suo scopo ospitando e permettendo lo sviluppo della nuova colonia.

_F6 www.flickr.com/photos/max_westby.

SOTTO: Particolare fotografico che mostra i sistemi di aggancio degli alveari alle strutture di sostegno adiacenti.



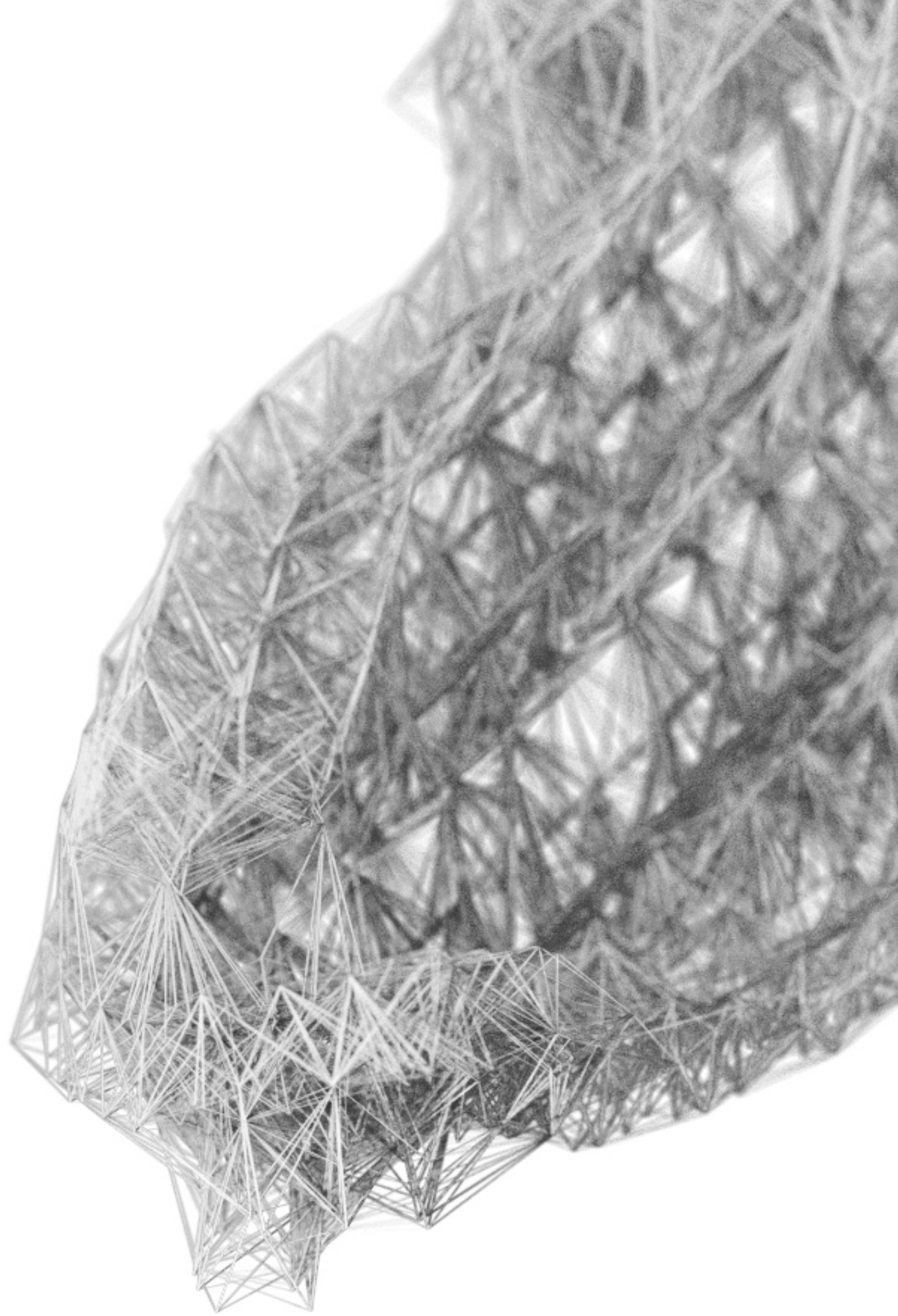


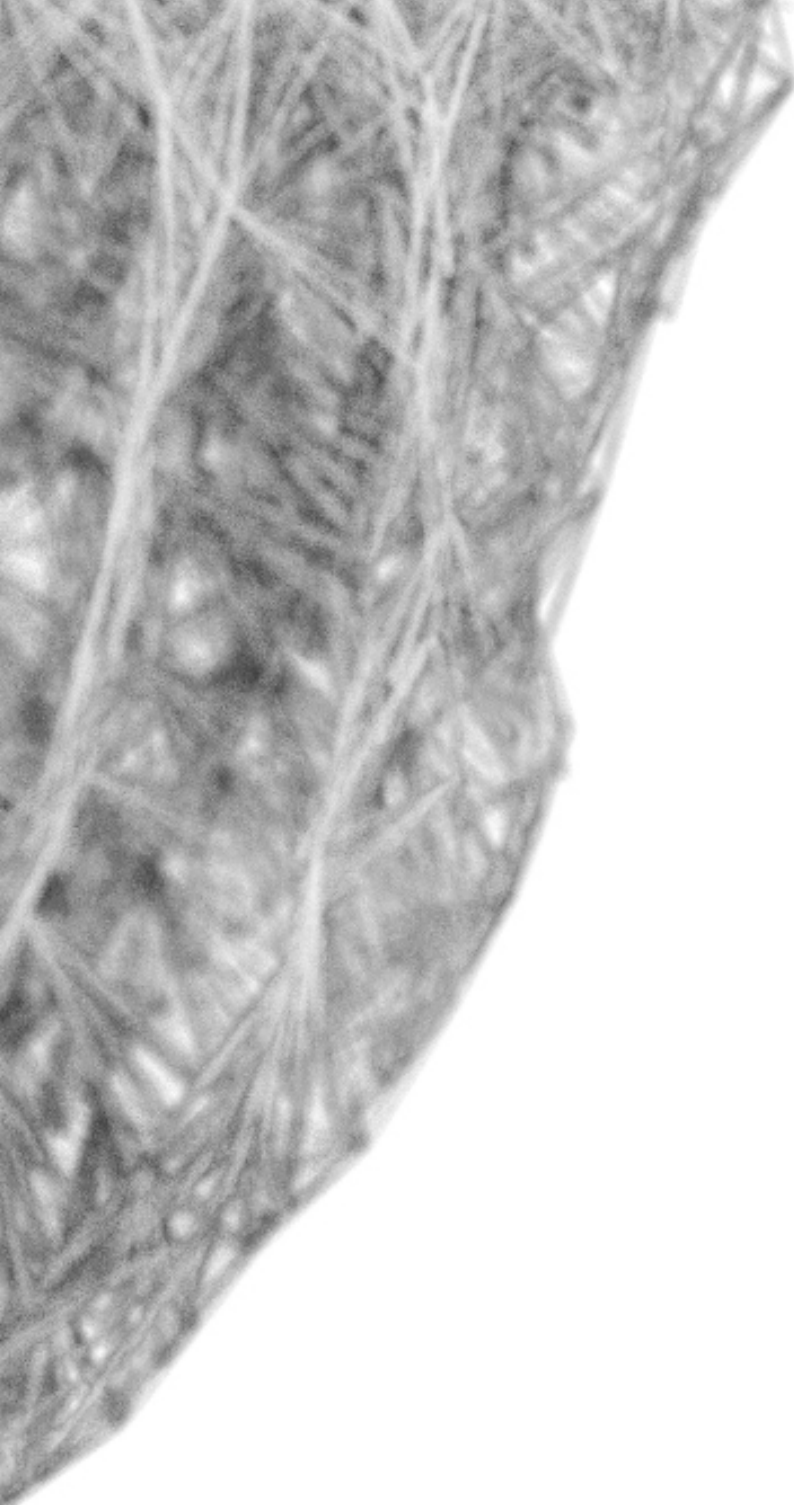


_F8: B.DARCHEN, R.DARCHEN, "Il fantastico mondo delle api".
A FIANCO: Top view della disposizione dei favi, il cui andamento si adatta in questo caso ai vincoli della cavità in cui si sviluppa.

_F7: <https://twitter.com/LondonBeeKeeper>

A FIANCO: Immagine che mostra la capacità di adattamento dei sistemi auto-organizzanti alle condizioni ambientali. Le intelligenze collettive (in questo caso il gruppo di api impegnato nella costruzione del fave) sono infatti in grado di realizzare strutture estremamente complesse pur seguendo semplici regole base, per sfruttare al massimo le problematiche e le opportunità offerte dal contesto.





processo digitale

"What if our buildings were grown, not built?"

N. Oxman

_1: Processing v2.2.1
© 2004-2013 Ben Fry and Casey Reas
© 2001-2004 Massachusetts Institute of
Technology

Dallo studio eseguito sulle api e sulle loro "capacità costruttive" si è poi passato alla realizzazione di un modello virtuale, che si ispirasse al fenomeno naturale da cui questa ricerca ha avuto origine. Si è quindi cercato di trasporre in linguaggio informatico, per la precisione Java tramite l'utilizzo di processing¹, quelle che sono le principali caratteristiche e fasi del processo di crescita degli alveari naturali, semplificandole. In particolare ci si è concentrati su tre famiglie di comportamenti che potessero avere interessanti riscontri in campo architettonico e di design.

La prima include tutti i comportamenti fisico e meccanici del materiale. Si è quindi considerato un sistema fisico che approssimasse quello reale (realizzato poi in fase di prototipazione in ABS) e che imitasse le caratteristiche meccaniche del role model di riferimento introducendo le capacità di autostabilizzazione, ottimizzazione materica e cambiamento delle proprietà fisiche del materiale nel tempo (al fine di simulare il passaggio dallo stato viscoso a quello solido).

Con la seconda famiglia comportamentale si sono invece presi in considerazione le capacità stigmergiche del sistema biologico "api-alveare", garantendo così tra gli agenti una comunicazione indiretta (ovvero tramite il deposito materico e quindi una modifica dell'ambiente in cui si trovano). Ciò influenza direttamente il moto dei singoli agenti, che vengono guidati nel loro movimento e nella scelta dei punti in cui costruire dal materiale già depositato permettendo così una concentrazione del deposito e l'emergere di pattern di distribuzione materica.

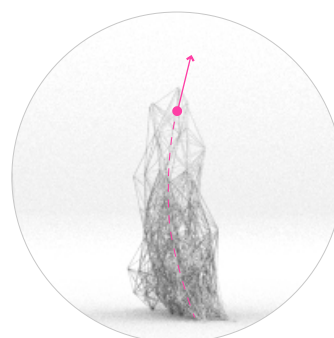
La terza famiglia considerata è quella che include i comportamenti che garantiscono l'adattamento al contesto. Gli agenti sono infatti programmati in maniera tale da riuscire a leggere le caratteristiche del contesto in cui si trovano (come valori scalari e campi vettoriali) per farsi influenzare nel movimento. Inoltre essi sono in grado di vedere e leggere ostacoli preesistenti, che possono inglobare o sfruttare come punti di ancoraggio.

Di seguito vengono quindi riportati i principali comportamenti implementati per gli agenti utilizzati nelle simulazioni, che danno origine nel loro complesso, ad un sistema auto-organizzante la cui popolazione interagisce principalmente per stigmergia.

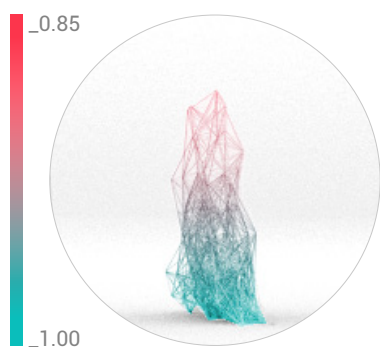
DEPOSITO ED AUTOSTABILIZZAZIONE

Ogni agente durante il suo percorso abbina al movimento una continua analisi delle condizioni ambientali e della vicinanza con il materiale già depositato. Quando, in un particolare momento ed in un particolare luogo sussistono le condizioni idonee (di temperatura, intensità del campo vettoriale e di vicinanza con materiale già depositato) esso rilascia una piccola struttura fisica, composta da "particles" e "springs". Ogni particella depositata tende quindi a connettersi alle particelle vicine già esistenti tramite una spring secondo un criterio di vicinanza, diventando parte di un sistema più complesso. Ogni spring creata è contraddistinta da caratteristiche meccaniche e fisiche (come la rigidità e la lunghezza a riposo) definite a priori. Il sistema costruttivo così creato (dotato quindi di elasticità) in ogni istante della simulazione risente della forza di gravità e la struttura creata tende ad autostabilizzarsi raggiungendo una configurazione equilibrata. Il deposito complessivo sarà quindi in continuo mutamento sotto l'azione delle forze esterne.

In secondo luogo questo materiale è il principale strumento di interazione tra gli agenti. Essi infatti, in linea con quello che viene definito comportamento stigmergico, interagiscono tramite tracce rilasciate nell'ambiente. In questo caso quindi il deposito stesso, proprio come la cera per le api, oltre ad essere la componente prettamente fisica, guida i depositi successivi, favorendo così un certo livello di concentrazione materica.



_F1: materiale depositato dal singolo agente durante il suo percorso.



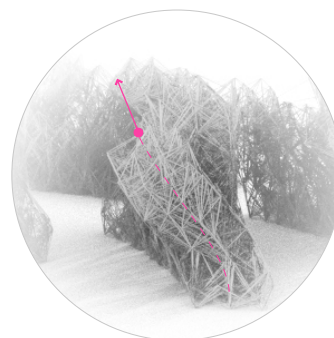
_F2: visualizzazione dell'aumento di rigidità (stiffness) proporzionale all'età.

VARIAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE NEL TEMPO

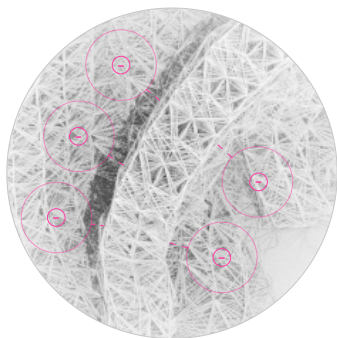
Caratteristiche fondamentali di tutti i processi biologici è la variazione delle condizioni nel tempo. Così come avviene per la cera depositata dalle api, che passa dallo stato viscoso a quello solido perdendo di elasticità e deformabilità anche nel modello digitale è stata inserita una variabilità materica e fisica temporale. In pratica ciò è stato realizzato incrementando ad ogni frame la rigidità delle springs già depositate, moltiplicandone il valore nell'istante considerato per un fattore moltiplicativo maggiore di uno. Così facendo si ottiene una ulteriore diversificazione tra gli elementi strutturali, che oltre ad avere lunghezze iniziali e lunghezze di riposo diverse, saranno anche caratterizzate da un indicatore proporzionale all'età della spring stessa. Il risultato è quindi quello di avere una deformabilità decrescente all'aumentare dell'età. Questo incremento continuativo nel tempo provoca la completa perdita di elasticità degli elementi più vecchi, che trasformandosi in corpi rigidi (stiffness pari a 1) si fissano, bloccando la loro posizione e non risentendo più di ciò che avviene nel resto della struttura.

DEPOSITO IN DOPPIA SEZIONE

Al fine di raggiungere un adeguato compromesso tra ridondanza degli elementi strutturali e rigidità locale dei singoli favi si è optato per un deposito a doppia sezione da parte di ciascun agente. Ciò vuol dire che ogni qual volta sussistano le condizioni idonee il materiale viene rilasciato attraverso il deposito di due celle cubiche (ottenute da un sistema di particles più springs) affiancate, proprio come avviene nei favi naturali quindi, in cui ciascuno dei quali è composto da celle accessibili su entrambi i lati. Così facendo è possibile garantire una maggiore rigidità strutturale pur mantenendo inalterate le capacità meccaniche del materiale, ed è quindi possibile diminuire il range di distanza per il collegamento tra particelle. Riducendo infatti la distanza massima di collegamento iniziale ad un valore pari a $1.5D$ (dimensione del lato del deposito) è possibile abbassare notevolmente il numero di connessioni non fondamentali, mantenendo però una ridondanza adeguata che permetta una idonea sicurezza strutturale. Con questo tipo di deposito inoltre, seppur utilizzando meno collegamenti strutturali ed un minor numero di particles afferenti allo stesso nodo, è possibile ottenere morfologie molto più articolate, con un maggior grado di complessità spaziale



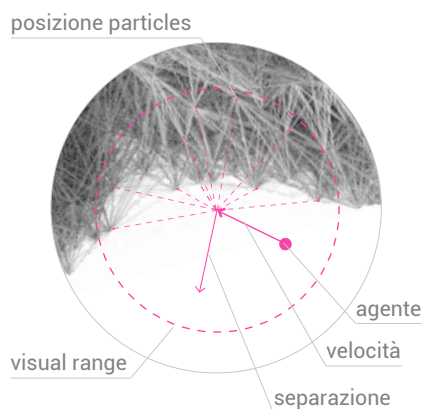
_F3: deposito in doppia sezione cubica



_F4: Deposito di cariche repulsive

DEPOSITO DI CARICHE REPULSIVE

Caratteristiche fondamentale del role model studiato è la capacità di creare strutture estremamente articolate ma che permettono una grande continuità dei vuoti interstiziali. Per simulare questo comportamento quindi e permettere la creazioni di percorsi ed accessi nella struttura, ad intervalli regolari ogni agente, insieme al deposito di materiale di cui si è già parlato, deposita anche delle cariche repulsive. Queste cariche non hanno valenza strutturale per il resto del sistema, ma hanno un effetto di repulsione nei confronti delle particelle vicine. Il materiale depositato da ogni agente quindi, tenderà a mantenera una distanza minima da quello depositato da altri agenti impegnati nella realizzazione di altri favi. Così facendo le connessioni tra favi diversi avvengono solamente quando la distanza tra essi è così bassa da richiederne la fusione in un singolo favo, oppure quando uno di questi collassa rendendo necessaria la creazione di un bridge di irrigidimento con le altre strutture. Questo sistema permette di incrementare notevolmente le capacità morfologiche della struttura ottenuta, favorendo l'ottenimento di una tettonica continua.



_F6: Separazione.

SEPARAZIONE

Il secondo comportamento stigmergico prevede l'interazione con le particles già depositate ma che si trovano nelle vicinanze dell'agente. In questo caso la lettura del deposito avviene senza valutazioni angolari (ovvero a 360°) rispetto alla posizione futura del costruttore.

In questo caso, una volta valutate le posizioni relative delle particelle ed il vettore che individua il loro baricentro (sempre relativamente alla posizione futura) esso verrà invertito per trovarne l'opposto, che verrà poi sommato (sotto forma di accelerazione) alla velocità attuale. Ne risulterà una vera e propria repulsione.

Questo comportamento è fondamentale al fine della crescita dell'intero sistema perchè impedisce agli agenti di penetrare nelle strutture già depositate, ottimizzandone il lavoro e permettendo un maggiore sviluppo complessivo.

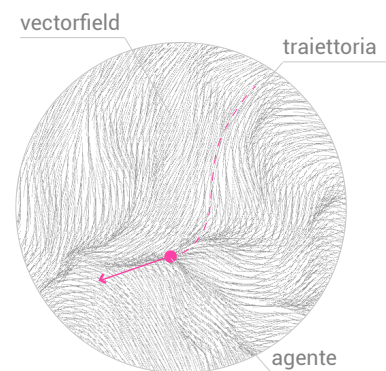
In sostanza quindi, ogni agente (se consideriamo solo i comportamenti stigmergici) viene attratto dal materiale deposto e tende ad avvicinarsi grazie alla coesione, ma quando la distanza dal deposito è minore del range previsto, esso viene influenzato anche dalla separazione, che spinge gli agenti a "percorrere" la struttura già esistente incrementandola e modificandola in base alle condizioni locali.

CAMPI VETTORIALI

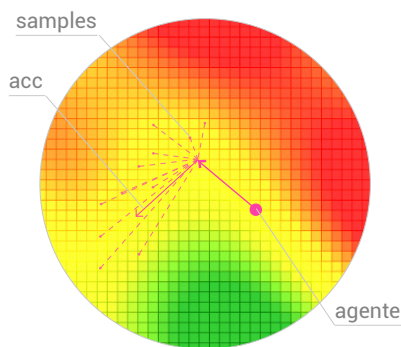
Caratteristica fondamentale al fine dell'adattamento ambientale da parte della struttura costruita e degli agenti è la continua lettura ed analisi dello spazio in cui si trovano. Al fine di rendere la simulazione il più simile possibile a ciò che avviene in natura con gli alveari, l'ambiente di lavoro (fortemente anisotropo) viene caratterizzato da diversi field (vettoriali e scalari) attraverso una suddivisione dello stesso in unità di spazio (voxel).

Per interagire con i campi vettoriali il singolo costruttore, ad ogni istante è in grado di leggere direzione, verso ed intensità del vectorfield in cui è immerso, ed in particolare della componente associata all'unità ambientale di base (voxel) in cui l'agente si trova. Il vettore così ottenuto viene poi scalato in base all'intensità prevista per questa componente di movimento, e sommato (sempre in maniera vettoriale) alla velocità dell'agente, sotto forma di accelerazione.

Così facendo il campo vettoriale influisce direttamente sul modo degli agents ed, in maniera indiretta, sulle direzioni principali di deposizione. Da queste interazioni emergono pattern costruttivi che tendono ad incanalare le principali correnti, proprio come avviene con il role model di riferimento, così da minimizzare le azioni orizzontali agenti sulla struttura.



_F7: Influenza del campo vettoriale.



_F8: Influenza della temperatura.

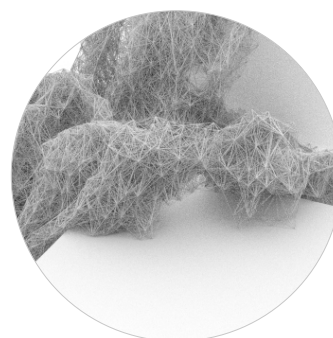
CAMPI SCALARI

Oltre che dai campi vettoriali l'ambiente finito utilizzato per le simulazioni è caratterizzato anche da campi di valori scalari. Al fine di valutarli per implementarli nel movimento, ogni agente, ad ogni frame, campiona l'ambiente circostante a partire dalla sua posizione futura, lanciando un elevato numero di "samples", a direzionalità e distanza random. Ogni sample ricava il valore scalare del voxel in cui si trova. Una volta immagazzinati questi valori l'agente considera solo quelli che rientrano nel range ottimale per la costruzione e si discostano di poco dal valore del voxel in cui si trova l'agente, il quale esegue una media, trovando il baricentro delle posizioni dei samples considerati. Il vettore che va dalla posizione futura al baricentro appena trovato sarà il vettore che influenzerà il moto dell'agente. Si noti inoltre come gli agenti siano in grado di depositare solo quando si trovano in aree a valori numerici entro i range ottimali per la costruzione. Così facendo, lo sviluppo e la crescita del sistema tenderà a seguire isovalori di campo (o comunque avverrà secondo aree a valori simili), così come le api durante la costruzione dell'alveare tendono a seguire zone in cui la temperatura è sempre compresa entro certi limiti (i più idonei per la sopravvivenza della colonia).

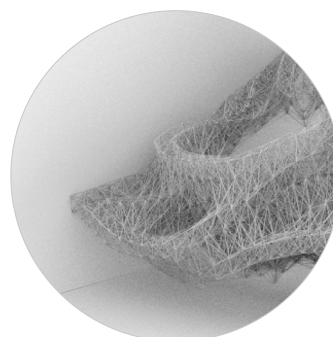
INTERAZIONE CON PREESISTENZE

Altra caratteristica fondamentale ai fini dell'adattamento del sistema al contesto in cui si trova è la sua capacità di interagire con elementi pre-esistenti.

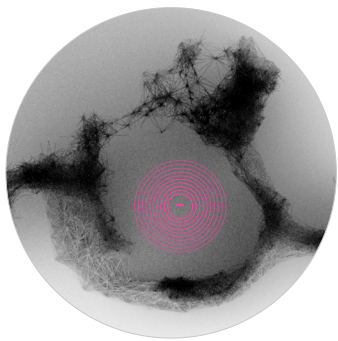
Esempi tipici di questi fattori di differenziazione ambientale possono essere considerati ostacoli localizzati all'interno dell'area di simulazione (come ad esempio volumi), oppure il "bounding box" dell'area. Nelle vicinanze di questi elementi gli agenti tendono a modificare il loro normale movimento e, leggendo questi ostacoli, essi sono in grado di evitarli, precorrendone la superficie esterna. Ogni qualvolta ne sussistano le condizioni poi, essi continuano nel loro lavoro di deposito, andando così ad incrementare la struttura realizzata dall'intero sistema. In questo caso un comportamento aggiuntivo caratterizza le "particles". Queste infatti, una volta depositate, se si trovano nelle immediate vicinanze delle pre-esistenze, tendono prima ad aderirvi, ed in un secondo momento a bloccare la loro posizione. Così facendo il sistema riesce a trovare punti di ancoraggio locale che permettono alla struttura complessiva una maggiore stabilità ed una maggiore possibilità di sviluppo, proprio come avviene per gli alveari quando inglobano ostacoli o vi si attaccano per favorire lo sviluppo complessivo.



_F9: superamento di ostacoli.



_F10: adesione a pareti esistenti.



_F11: generazione di vuoti.

CREAZIONE DI VUOTI

Per aumentare le potenzialità tettoniche e morfologiche del sistema è stato implementato un ulteriore comportamento per gli agenti lavoranti. Introducendo infatti nell'ambiente di simulazione delle semplici "mesh", che schematizzano volumi e superfici, è possibile introdurre nuove regole per influenzare la struttura finale. Gli agents quindi durante il loro percorso leggono queste mesh e tendono a seguirle durante il processo di crescita del sistema. Così facendo si dà al sistema la possibilità di creare vuoti e spazi, fondamentali in campo architettonico e di design.

Si noti però come questi spazi siano rispettati dagli agenti, ma non lo siano necessariamente dalla struttura nel suo complesso. Il materiale depositato infatti, durante la fase di auto-stabilizzazione in questo caso non è soggetto a vincoli di vicinanza nei confronti di queste mesh, ed è quindi libero di ri-organizzarsi nella maniera migliore ai fini della propria stabilizzazione.

Questo compartimento non va quindi ad inficiare le capacità auto-organizzative dell'intero sistema, ma ne estende le potenzialità permettendone una maggiore applicabilità in campo architettonico, rendendolo in grado di creare volumi interni ed esterni.

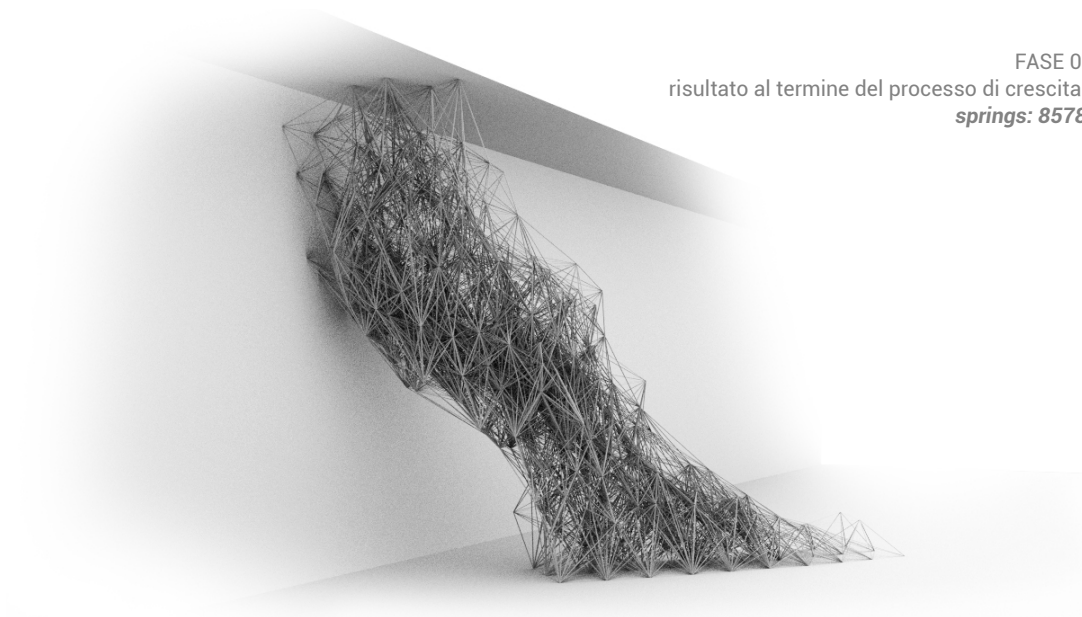
Al termine del processo di deposito ed autostabilizzazione, ovvero al termine del ciclo costruttivo, viene eseguito un controllo su tutte le "springs"^{N1} depositate. Di ognuna vengono infatti analizzate la "rest length"^{N2} (ovvero la lunghezza a riposo) e la lunghezza effettiva ottenuta al termine della simulazione. Così facendo si ottengono i due valori necessari a determinare lo stato deformativo, dato dal rapporto tra queste due grandezze. Il risultato così ottenuto può essere inteso come allungamento percentuale (con riferimento alla lunghezza a riposo) di ogni singolo elemento strutturale, e darà un numero compreso tra zero ed uno nel caso in cui l'elemento sia soggetto a compressione, ed un numero maggiore di uno se risulterà teso.

L'analisi deformativa ha un duplice scopo. Il primo è quello di evidenziare anche graficamente lo stato deformativo dell'intera struttura, così da mostrare immediatamente le zone maggiormente sollecitate. Il secondo scopo invece, è esattamente il contrario, ovvero l'individuazione di tutti quegli elementi strutturali così poco sollecitati da poter essere rimossi. E' infatti possibile isolare tutte quelle "springs" il cui allungamento percentuale rispetto alla "rest length" è inferiore ad una determinata soglia ed eliminarle così da evitare l'utilizzo di materiale non indispensabile. Al fine di ottenere una struttura il più possibile identica a quella derivante dal deposito degli agents si sono eliminati solo gli elementi con una modifica percentuale di lunghezza sotto al tre per mille della propria lunghezza a riposo.

_N1: gli elementi depositati dal punto di vista strutturale risultano composti da springs. Con tale termine si considerano gli elementi lineari come molle, ovvero suscettibili a deformazione e con una correlazione lineare tra deformazione e sforzi.

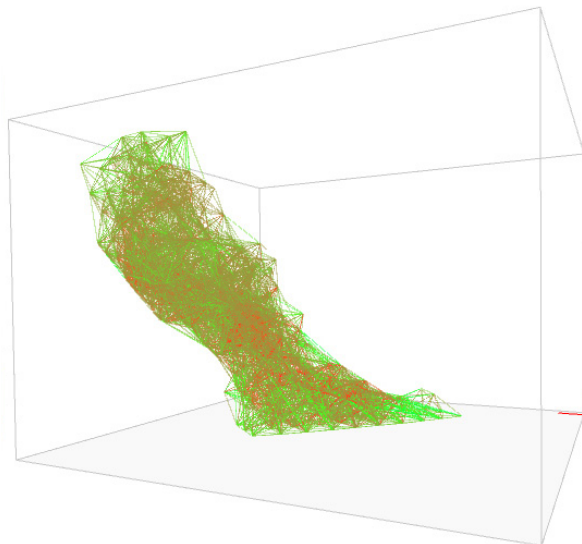
_N2: con rest length si intende la lunghezza alla quale corrisponde uno sforzo pari a zero (ovvero la lunghezza a riposo cioè quella a cui la molla si riporta quando non è soggetta a sforzi).

FASE 0:
risultato al termine del processo di crescita.
springs: 8578



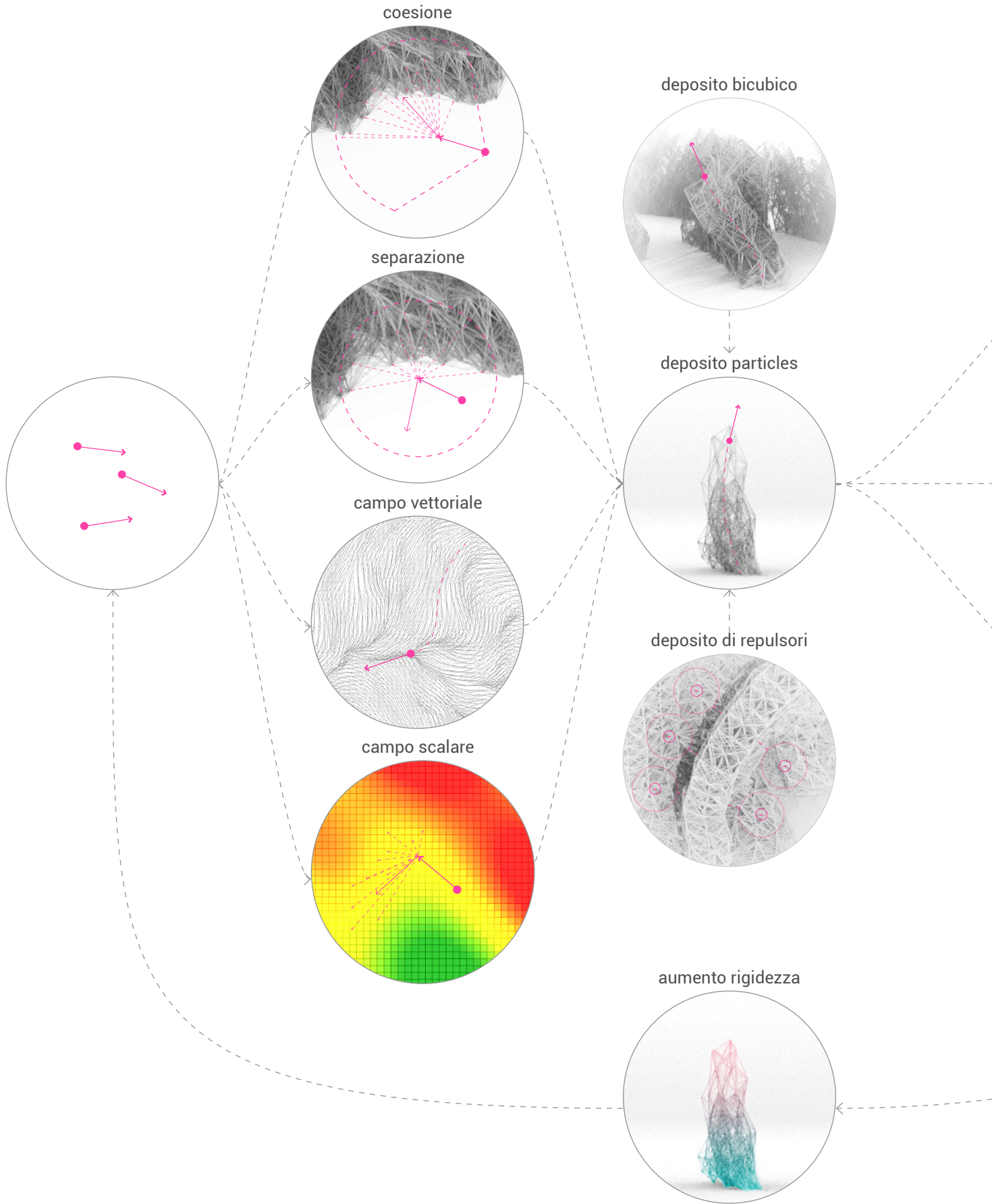
FASE 1:
analisi dello stato deformativo del
materiale depositato e rimozione degli
elementi meno sollecitati.

scala allungamento percentuale
050 075 100 125 150

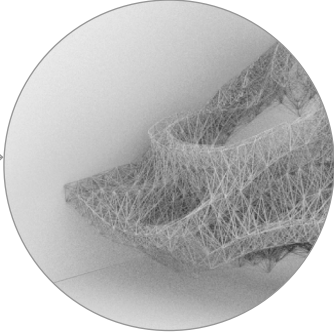


FASE 2:
risultato del processo di ottimizzazione.
springs: 8054

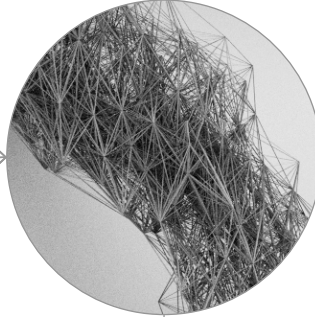




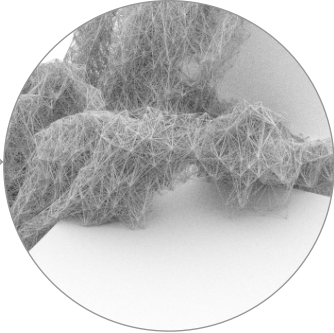
adesione al contesto



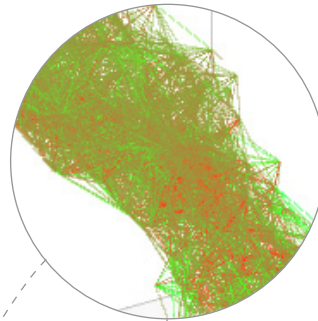
struttura globale stabile



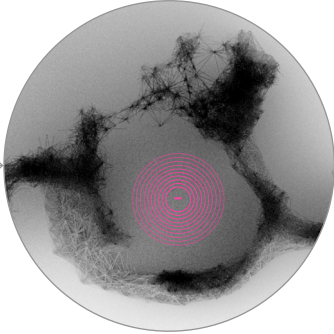
reazione ad ostacoli



ottimizzazione materiale



generazione di vuoti



struttura finale



COESIONE

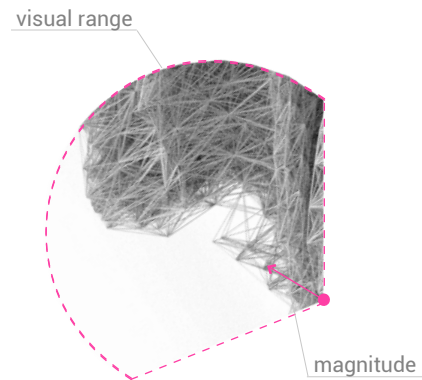
Per meglio definire potenzialità e criticità del sistema codificato per ogni parametro fondamentale che concorre al processo di crescita è stato realizzato uno studio sistematico e tabellato. Nella pagina a fianco è riportato uno schema sintetico di questa analisi che permette una migliore comprensione del legame tra la morfologia e la variazione dei parametri riguardanti la coesione stigmergica.

Tutti gli altri parametri restano costanti in tutte le configurazioni ottenute e sono pari a:

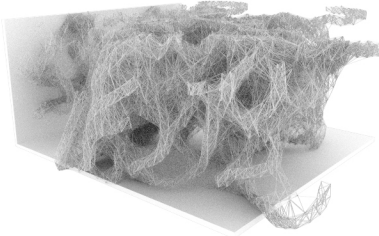
_tSepRange=12 (massima distanza per la separazione);
_tSepMag=1 (modulo della forza di separazione);
_flowMag=0.05 (influenza dovuta al field ambientale);
_springsL=[0.6D;2.5D] (lunghezza max/min delle springs).

Come si evince dal cladogramma una diminuzione della distanza massima di lettura delle particles già depositate (tCohRange) provoca una concentrazione locale della struttura. Gli agents infatti, non potendo leggere le strutture più lontane tendono ad attaccarsi a quelle depositate nelle immediate vicinanze, rendendo meno probabile l'emergere di tettoniche continue, ma generando strutture più piccole ed isolate tra loro. Aumentando il range visivo invece si ottiene una concentrazione materica più distribuita, grazie anche all'interazione di ogni agente con un numero maggiore di particles.

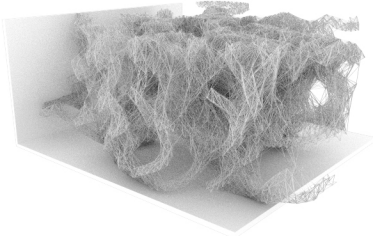
Aumentando invece il parametro della intensità del vettore di coesione si interviene su quella che è la rapidità con cui ogni agente tende ad avvicinarsi alla struttura già depositata. A valori bassi del parametro di magnitudine corrispondono quindi strutture più confuse e poco compatte. Aumentando questo valore invece si ottengono maggiori concentrazioni materiche e maggior compattezza, nonché l'emergere di pattern derivanti dall'interazione tra gli agenti e le strutture e gli agenti ed i campi vettoriali e scalari in cui si trovano.



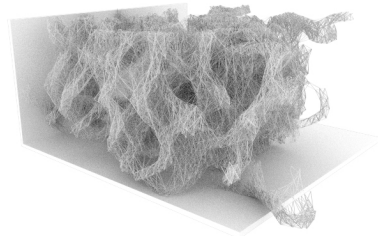
visual range: [0;60]



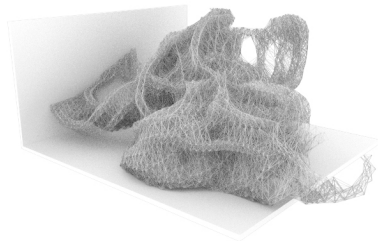
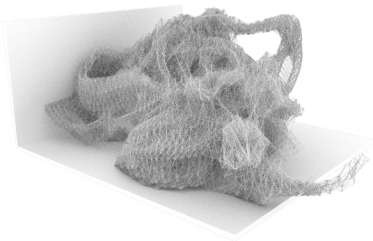
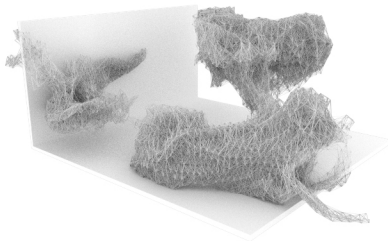
visual range: [0;100]



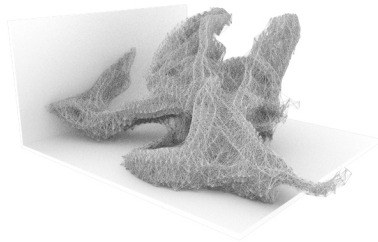
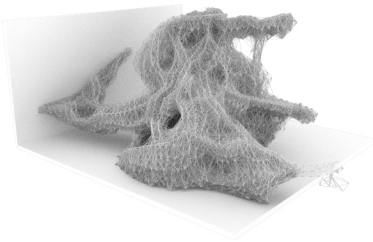
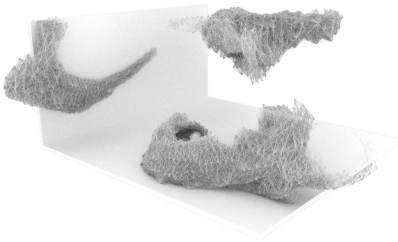
visual range: [0;120]



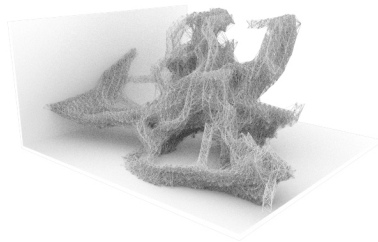
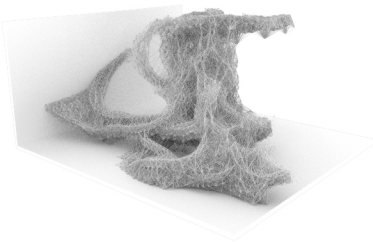
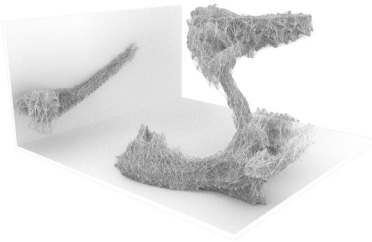
cohesion
magnitude:
0.1



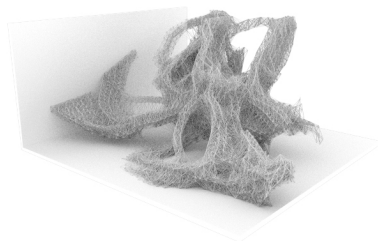
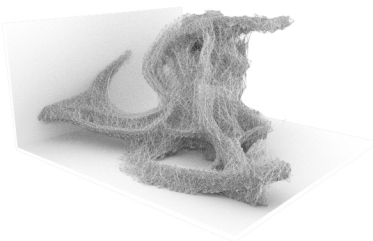
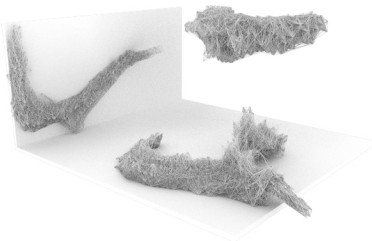
cohesion
magnitude:
0.5



cohesion
magnitude:
1



cohesion
magnitude:
2



cohesion
magnitude:
3

SEPARAZIONE

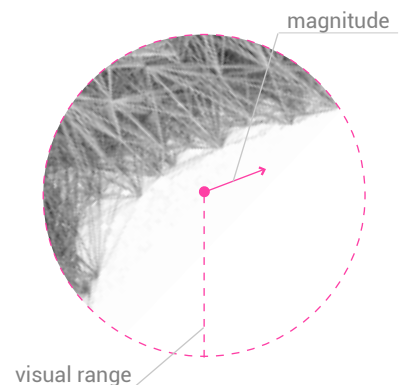
Per meglio definire potenzialità e criticità del sistema codificato per ogni parametro fondamentale che concorre al processo di crescita è stato realizzato uno studio sistematico e tabellato. Nella pagina a fianco è riportato uno schema sintetico di questa analisi che permette una migliore comprensione del legame tra la morfologia e la variazione dei parametri riguardanti la separazione stigmergica.

Tutti gli altri parametri restano costanti in tutte le configurazioni ottenute e sono pari a:

_tCohRange=100 (massima distanza per la coesione);
_tCohMag=1 (modulo della forza di coesione);
_flowMag=0.05 (influenza dovuta al field ambientale);
_springsL=[0.6D;2.5D] (lunghezza max/min delle springs).

Come si evince dal cladogramma una diminuzione della distanza massima di lettura delle particles già depositate (tSepRange) provoca una concentrazione locale della struttura. Gli agents infatti, vengono guidati per buona parte del loro percorso dagli altri parametri, con la separazione che assume importanza solo nelle immediate vicinanze del deposito. Aumentando il range visivo invece le strutture che si generano occupano un volume maggiore perchè gli agenti depositeranno ad una distanza maggiore dalla struttura già esistente.

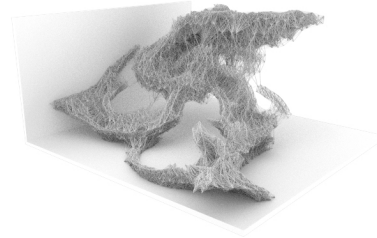
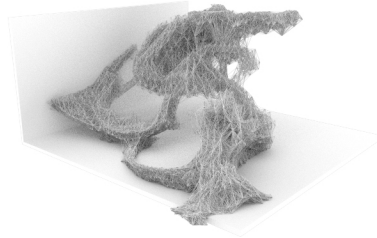
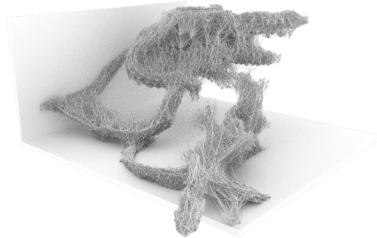
Aumentando invece il parametro della intensità del vettore di separazione si interviene su quella che è la rapidità con cui ogni agente tende ad allontanarsi alla struttura già depositata. A valori bassi del parametro di magnitude corrispondono quindi strutture molto compatte e concentrate a causa della sproporzione tra i valori di coesione e separazione. A valori più elevati corrispondono invece strutture che tendono via via ad espandersi occupando tutto lo spazio a loro disposizione, fino a tendere a strutture più confuse e dallo scarso potenziale progettuale.



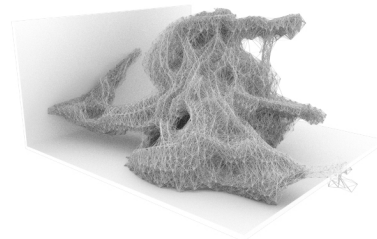
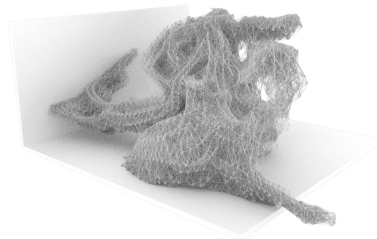
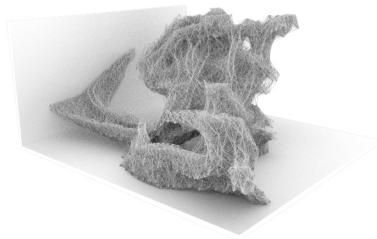
visual range: [0;5]

visual range: [0;8]

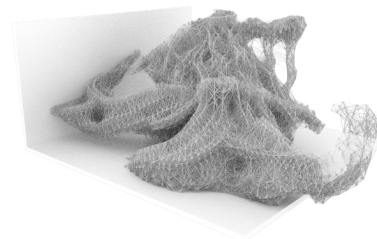
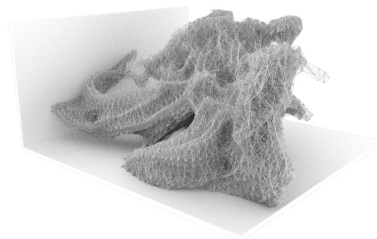
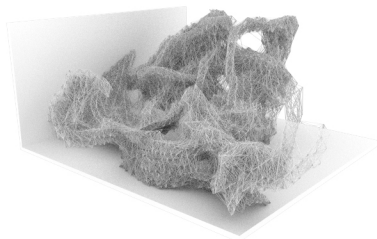
visual range: [0;10]



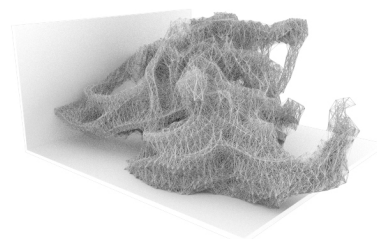
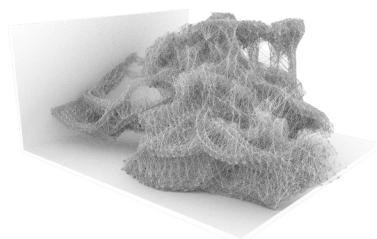
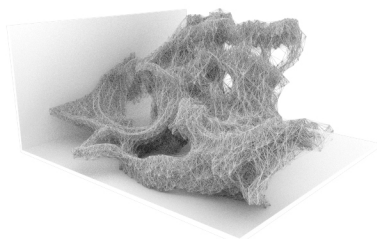
separation
magnitude:
0.1



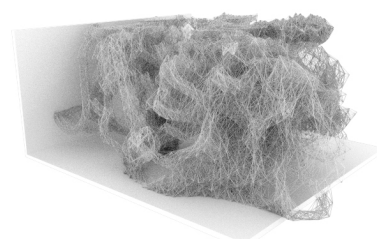
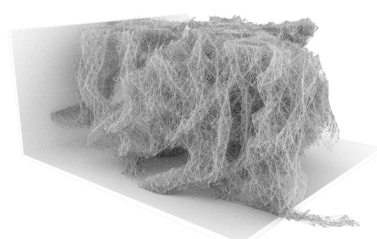
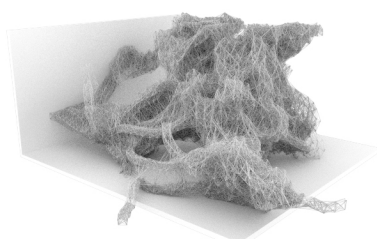
separation
magnitude:
1



separation
magnitude:
1.5



separation
magnitude:
2



separation
magnitude:
5

PARAMETRI FISICI

Per meglio definire potenzialità e criticità del sistema codificato per ogni parametro fondamentale che concorre al processo di crescita è stato realizzato uno studio sistematico e tabellato. Nella pagina a fianco è riportato uno schema sintetico di questa analisi che permette una migliore comprensione del legame tra la morfologia ed alcuni dei principali parametri fisici.

Tutti gli altri parametri restano costanti in tutte le configurazioni ottenute e sono pari a:

_tCohRange=100 (massima distanza per la coesione);

_tCohMag=1 (modulo della forza di coesione);

_tSepRange=12 (massima distanza per la coesione);

_tSepMag=1 (modulo della forza di coesione);

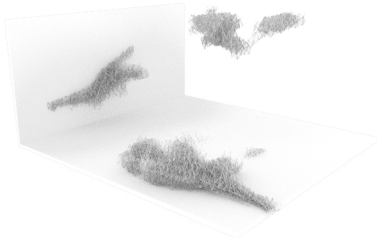
_flowMag=0.05 (influenza dovuta al field ambientale);

_D=5 (dimensione della singola cella depositata).

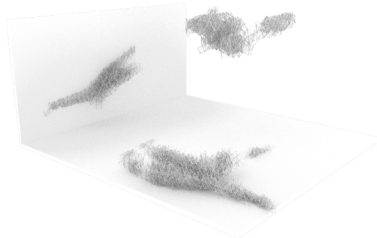
Per cull range qui si intende l'allungamento percentuale sotto il quale la spring non è ritenuta utile: ciò vuol dire che le springs il cui allungamento percentuale ricade in questo dominio (ovvero quelle meno deformate e quindi meno sollecitate) vengono eliminate al fine di ottimizzare il sistema e rimuovere il materiale non necessario.

Le lunghezze delle springs invece esprimono il dominio entro il quale due particles possono essere connesse da una spring. Se le particelle si trovano a distanza inferiore del valore minimo una delle due sarà eliminata, mentre se si trovano a distanza maggiore si ignoreranno. Questi valori vengono espressi in funzione del parametro D (dimensione del deposito di ogni agente). Dal grafico si nota chiaramente come ad un aumento del limite superiore del dominio corrisponda un maggior numero di springs create, e quindi maggior ridondanza e stabilità strutturale e quindi anche maggior possibilità di crescita, seppur attraverso una topologia molto più complessa.

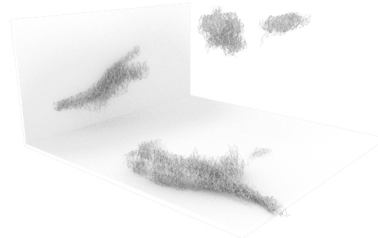
cull range (%): [0.005;0.02]



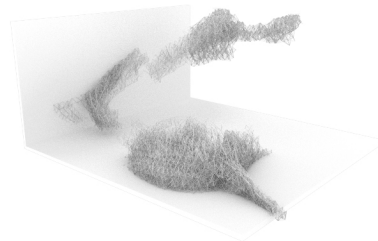
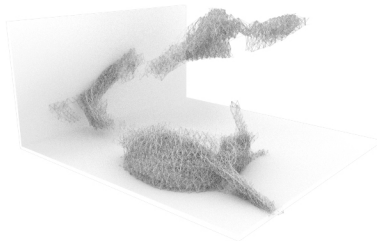
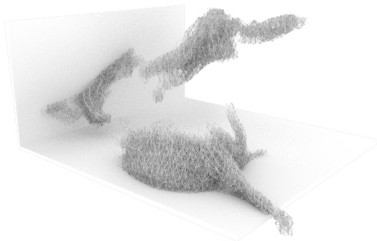
cull range (%): [0.02;0.05]



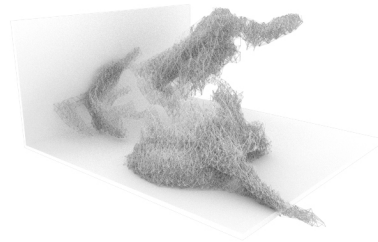
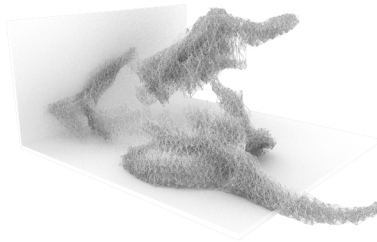
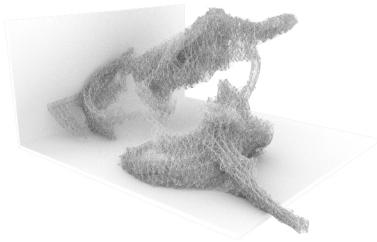
cull range (%): [0.05;0.1]



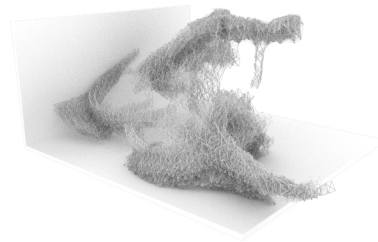
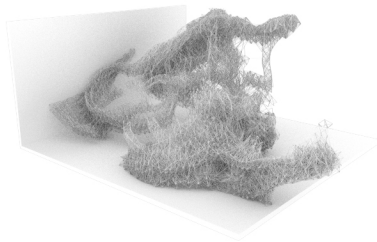
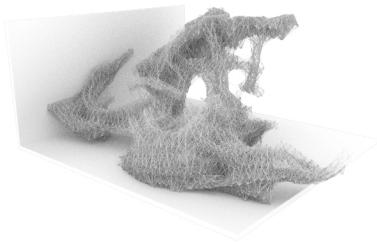
springs
length range:
[0.6;1.6]*D



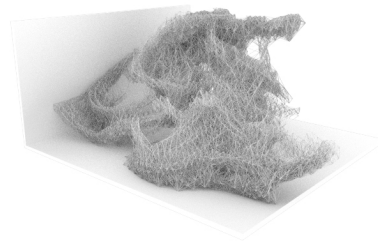
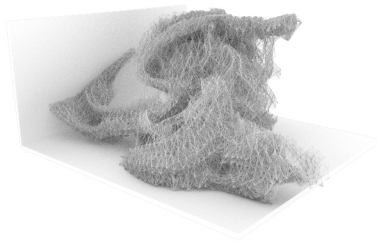
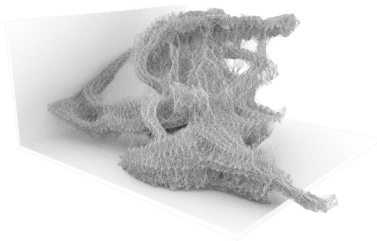
springs
length range:
[0.6;1.8]*D



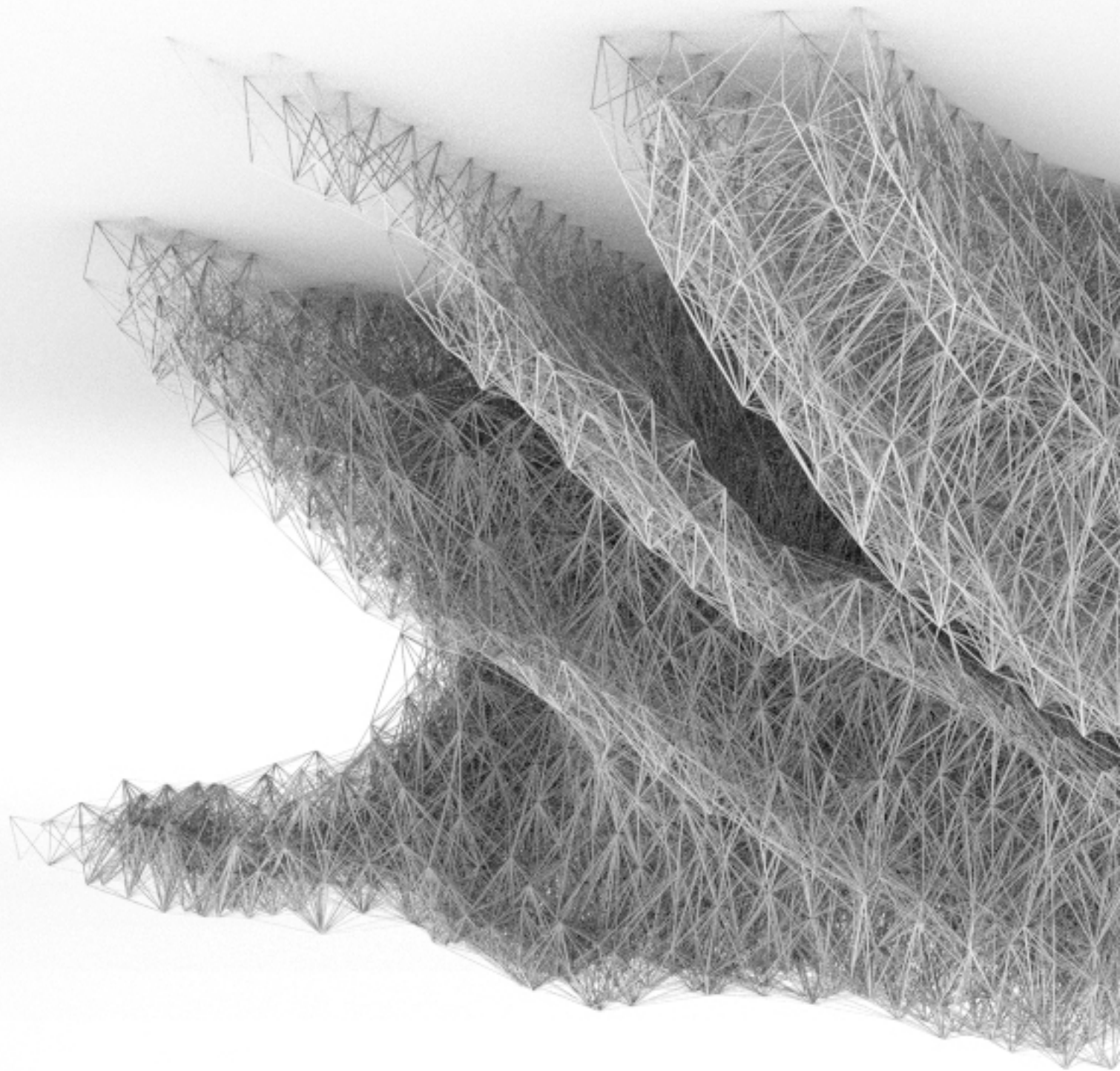
springs
length range:
[0.6;2]*D

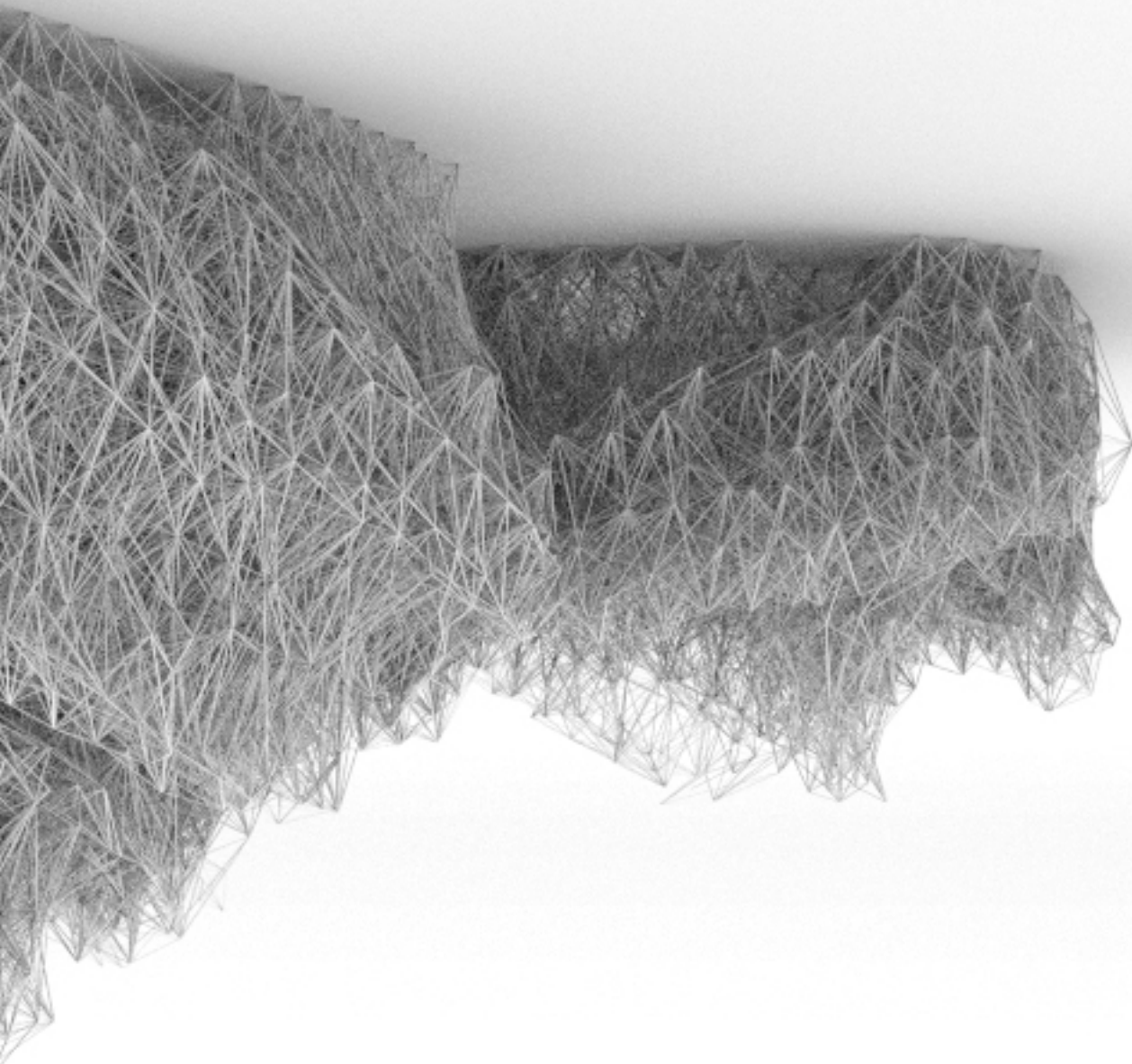


springs
length range:
[0.6;2.2]*D



springs
length range:
[0.6;2.5]*D





ricerca tettonica

"There is a great power and creative energy in self-organization, but it needs to be channeled toward specific forms for it to blossom into something like intelligence."

S. Johnson

_N1: Il termine tettonica deriva dal greco (*tektonikos*) "che riguarda l'arte del costruire".

Obiettivo di questa ricerca è sempre stato quello di trasportare caratteristiche e potenzialità del role model studiato ad una scala diversa rispetto a quella a cui si trovano in natura.

Per rendere applicabili questi principi per scopi diversi (come ad esempio quello del design, dell'architettura o dell'urbanistica) durante la fase di codificazione in linguaggio informatico si sono affrontate tematiche importanti con le quali ci si è continuamente confrontati; alcune legate soprattutto alla realizzabilità delle strutture ottenute (con l'obiettivo di arrivare alla prototipazione) mentre altre di tipo tettonico^{N1} ed architettonico. In questo capitolo ci occuperemo soprattutto di questa seconda tematica.

Il sistema multiagente spiegato nel capitolo precedente è il risultato di una lunga serie di sperimentazioni e di un percorso non lineare fatto anche di diversi tentativi, fallimenti e passi indietro, che hanno permesso però il raggiungimento di un sistema che (nonostante sia ancora migliorabile ed ottimizzabile) può essere definito come funzionale allo scopo e ricco di potenzialità.

Di seguito verranno quindi riportati ed analizzati alcuni degli step principali sviluppati durante il percorso di ricerca, così da mostrare l'evoluzione tettonica e funzionale del sistema studiato.

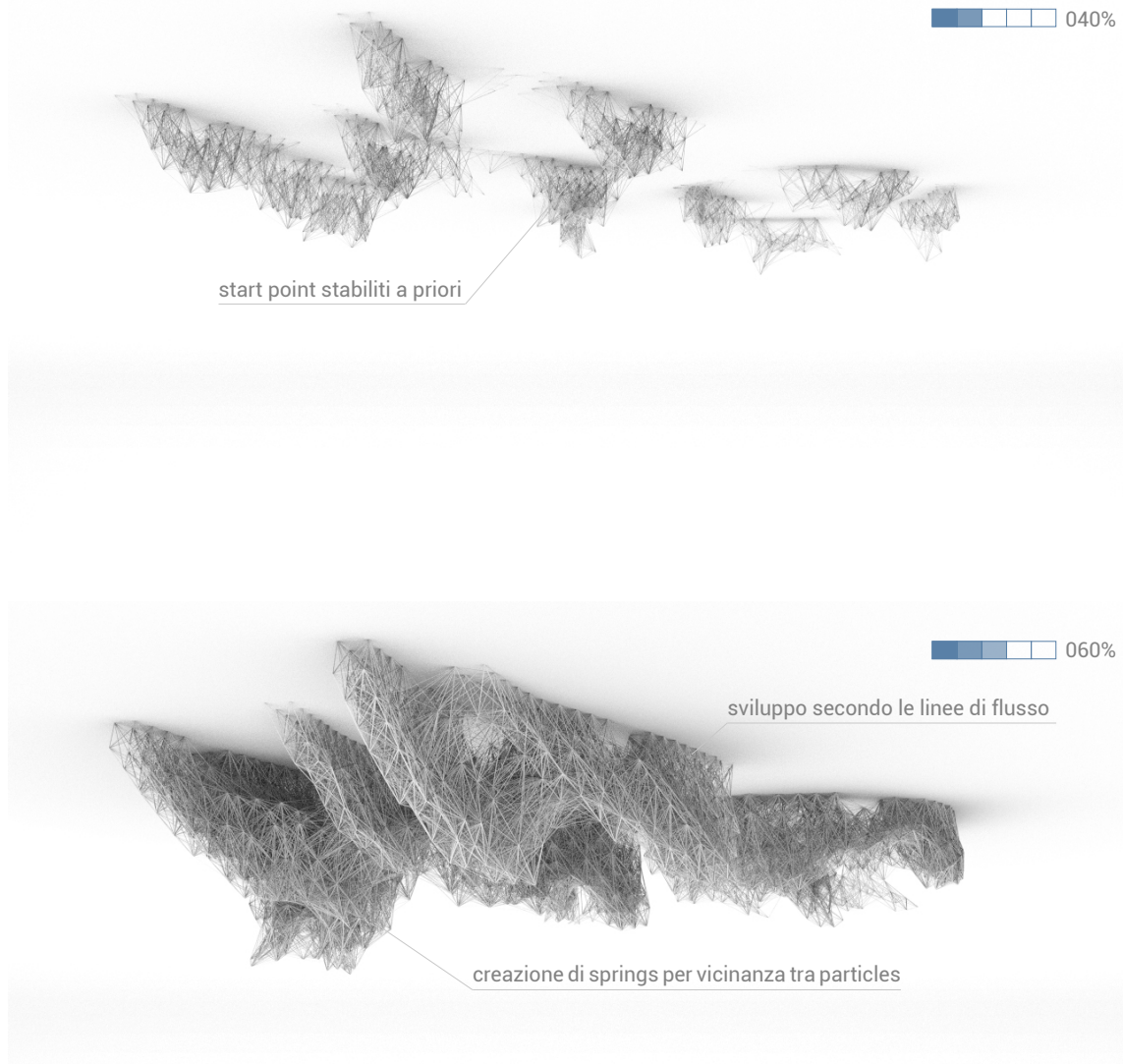
HA_v1.0

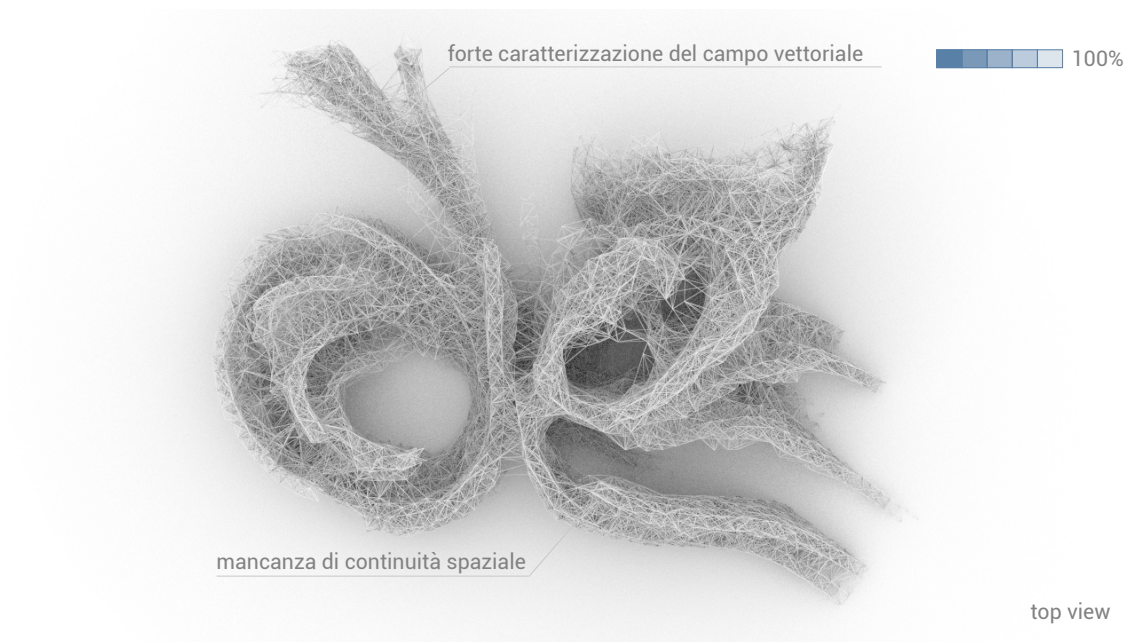
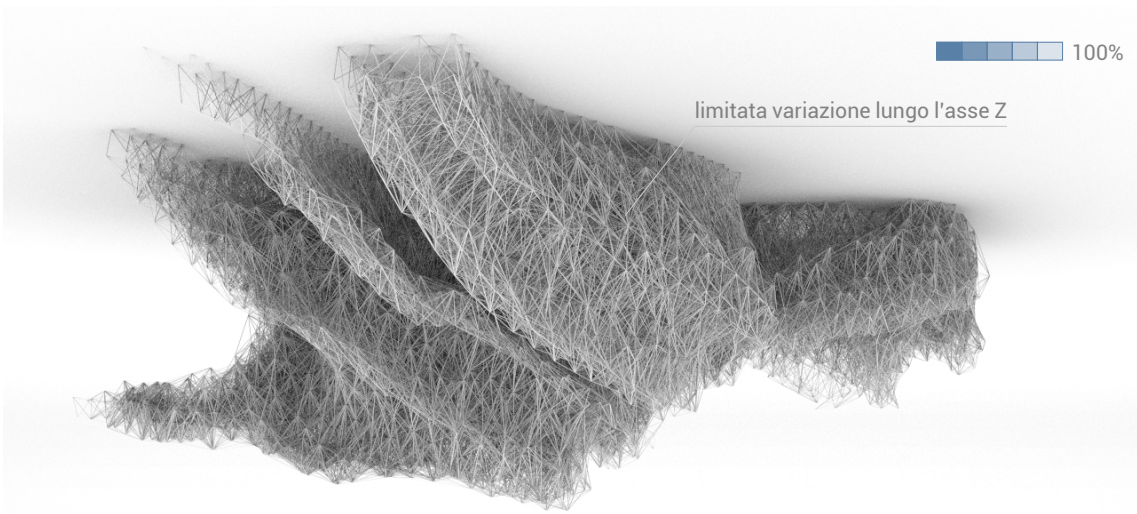
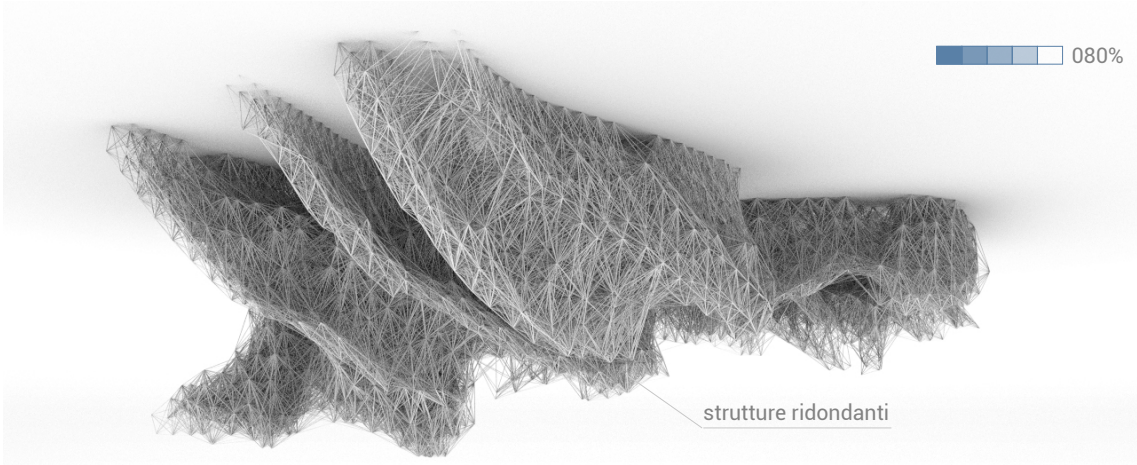
I primi risultati rilevanti da un punto di vista della ricerca tettonica si sono ottenuti quando si sono sperimentati agenti con movimento principalmente verticale.

Ciò che derivava da questa versione del sistema multiagente appare però ancora molto acerba. Ne risulta infatti un sistema potenzialmente interessante ma estremamente limitato da un punto di vista della valenza architettonica. Si creano infatti strutture continue ma manca completamente la continuità spaziale, ed inoltre ciò che maggiormente affiora è un comportamento abbastanza prevedibile, in cui la componente emergente (data dall stigmergia) è secondaria rispetto a quella di adattamento ambientale.

INPUT:

- _ambiente anisotropo (campo vettoriale)
- _start point iniziali definiti,
- _strutture appese,
- _comportamento stigmergico,
- _deposito a singola cella,
- _deposito cubico (4 particles),
- _caratteristiche meccaniche costanti del materiale depositato (rigidezza).





HA_v1.1

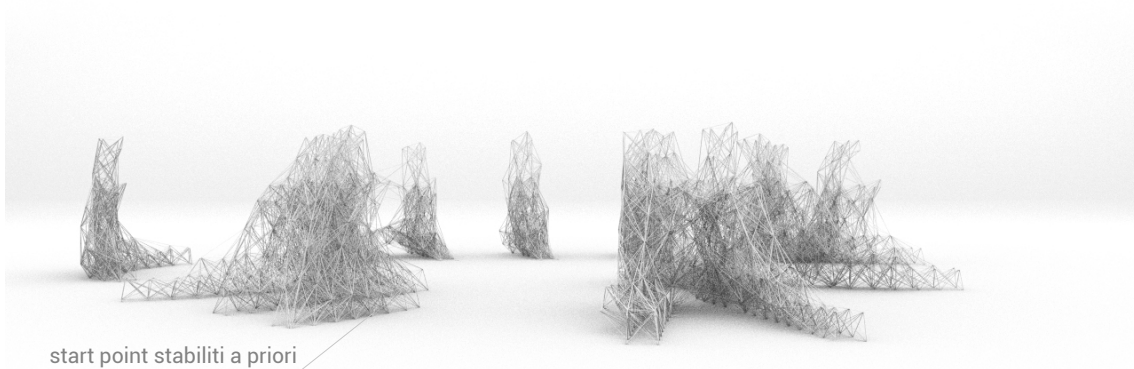
In questo secondo caso della versione v1 si sono sperimentate strutture appoggiate, i cui elementi erano sopposti principalmente a compressione.

Anche in questo caso si è ottenuto un sistema potenzialmente interessante ma estremamente limitato da un punto di vista della valenza architettonica. Si creano infatti strutture continue in grado di creare coperture ma ancora poco capaci di creare spazi fruibili ed interessanti, oltre ad essere ancora prevedibili e con poche capacità di variazione.

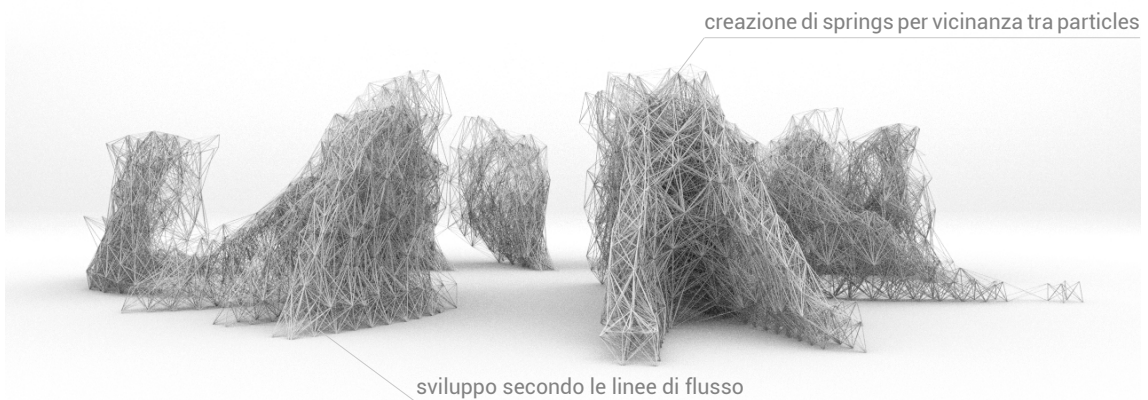
INPUT:

- _ambiente anisotropo (campo vettoriale)
- _start point iniziali definiti,
- _strutture appoggiate,
- _comportamento stigmergico,
- _deposito a singola cella,
- _deposito cubico (4 particles),
- _caratteristiche meccaniche costanti del materiale depositato (rigidezza).

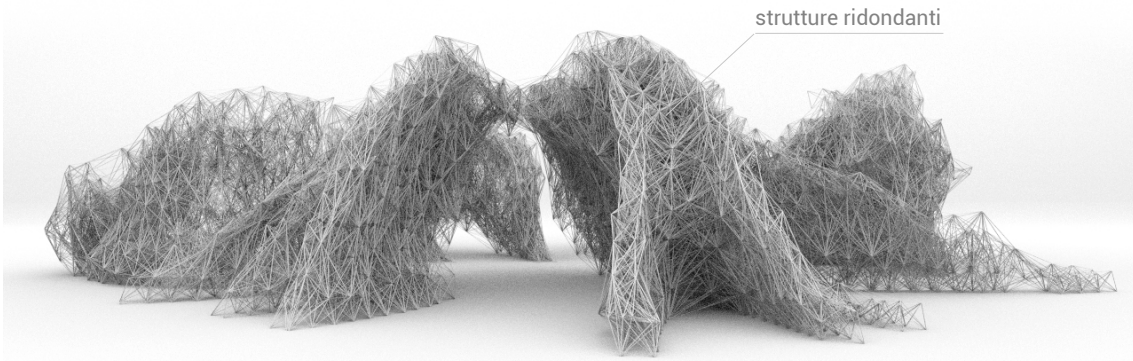
040%



060%

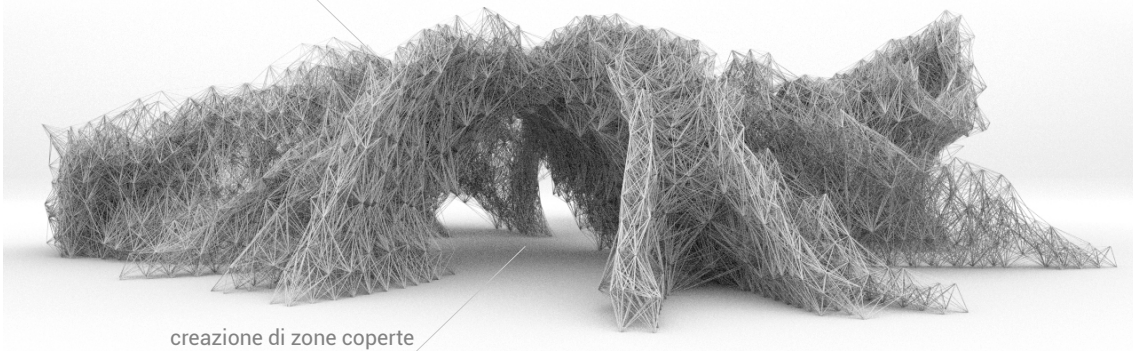


080%



100%

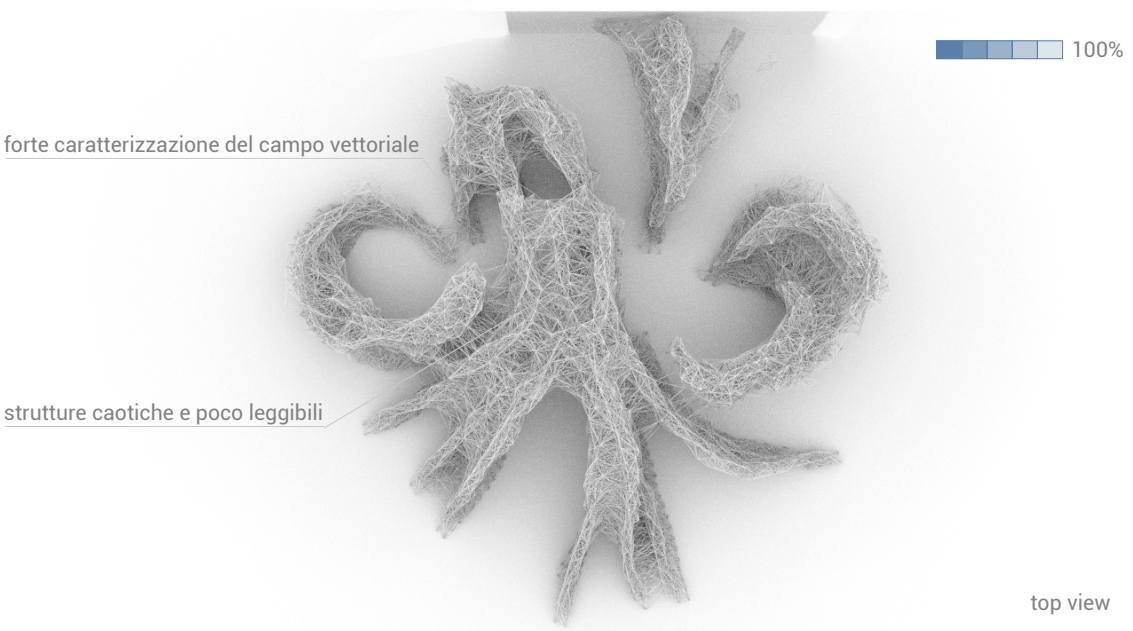
limitata variazione lungo l'asse Z



100%

forte caratterizzazione del campo vettoriale

strutture caotiche e poco leggibili



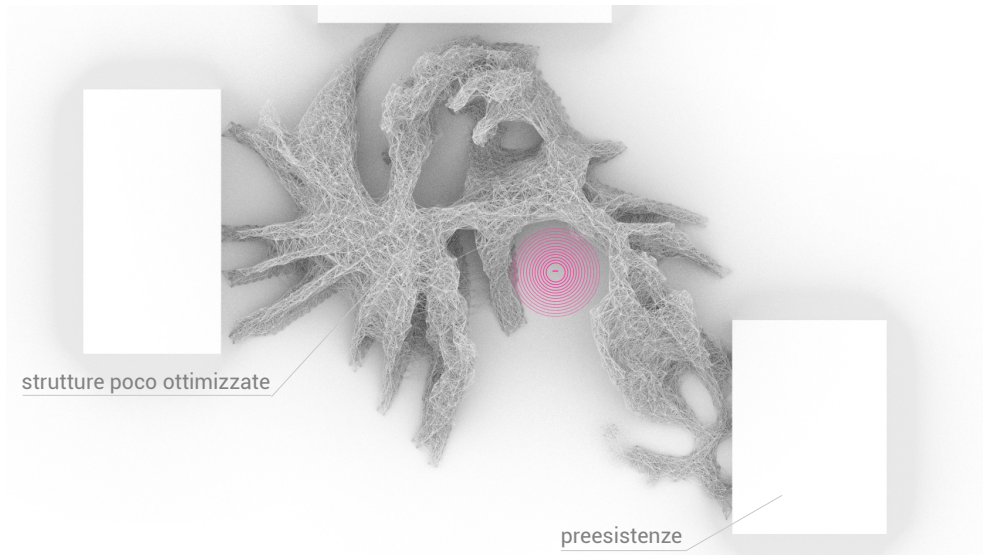
HA_v2.0/v2.1/v2.2

In questa versione, visto le limitazioni delle casistiche precedenti, ci si è concentrati sulle capacità di variazione e di adattamento del sistema. Per farlo sono stati introdotti nell'ambiente ostacoli e repulsori che hanno introdotto la possibilità di interazione ambientale e la creazione di percorsi e spazi con continuità di grado maggiore. Nonostante questi miglioramenti però la struttura risultante appare ancora limitata per quando riguarda le possibili configurazioni e le capacità di variazione nello spazio, soprattutto in verticale.

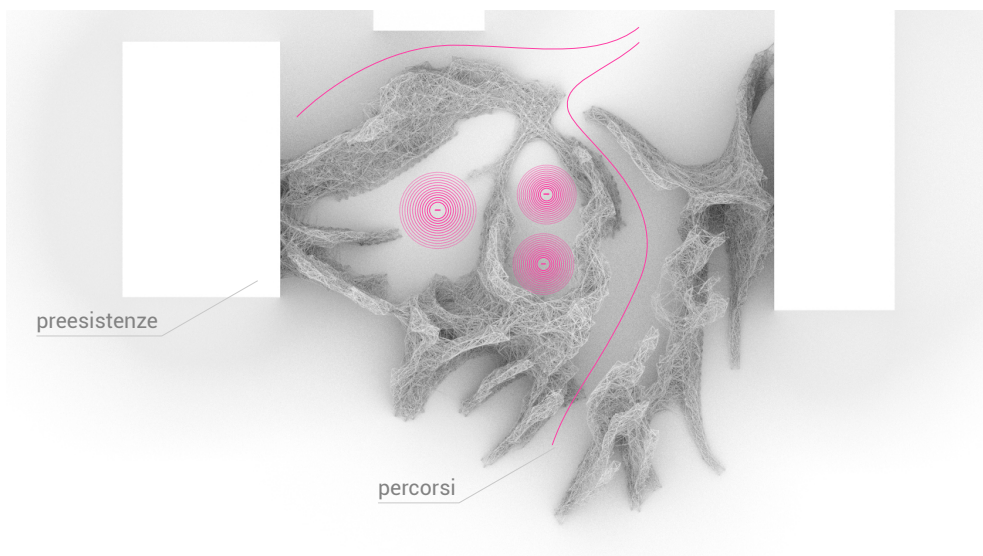
INPUT:

- _ambiente anisotropo (campo vettoriale)
- _start point iniziali definiti,
- _strutture appoggiate ed appese,
- _comportamento stigmergico,
- _deposito a singola cella,
- _deposito cubico (4 particles),
- _caratteristiche meccaniche costanti del materiale depositato (rigidezza),
- _presenza di repulsori ed ostacoli.

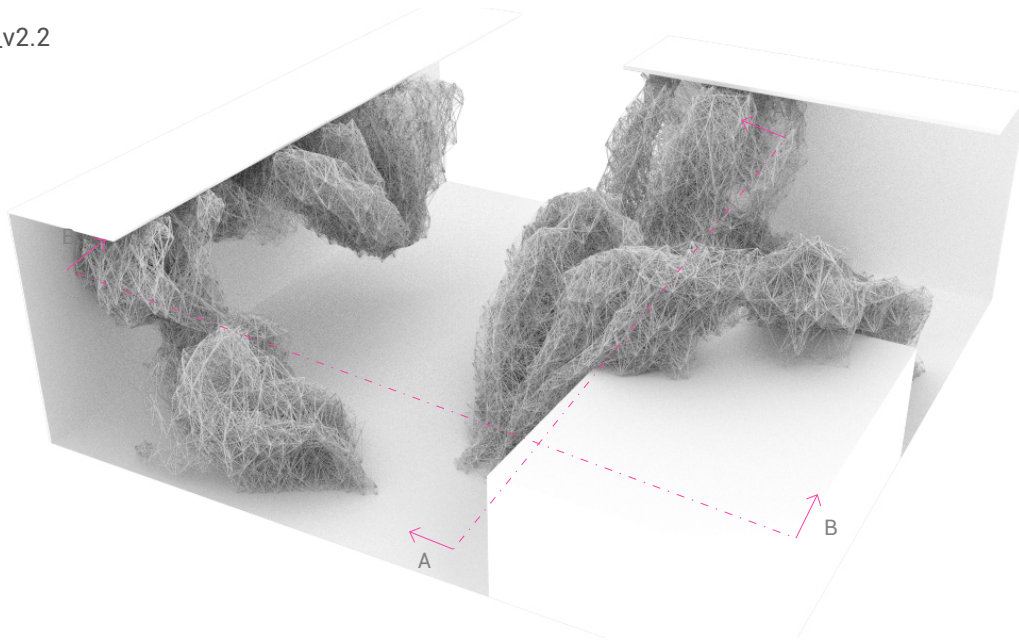
HA_v2.0



HA_v2.1

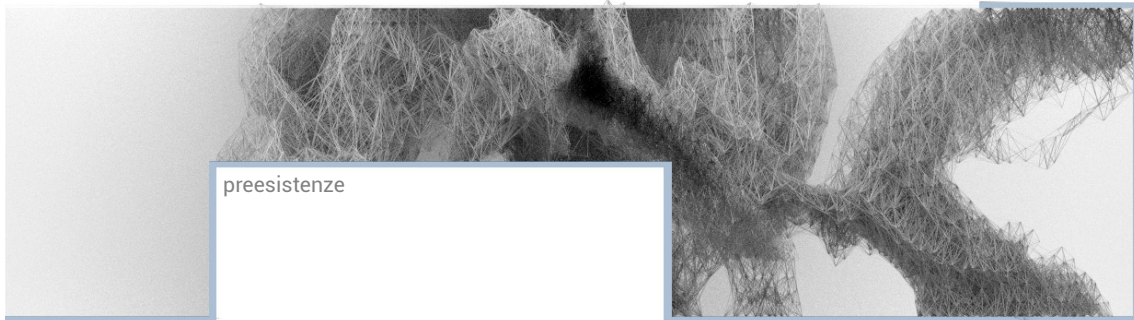


HA_v2.2



pt. di aggancio

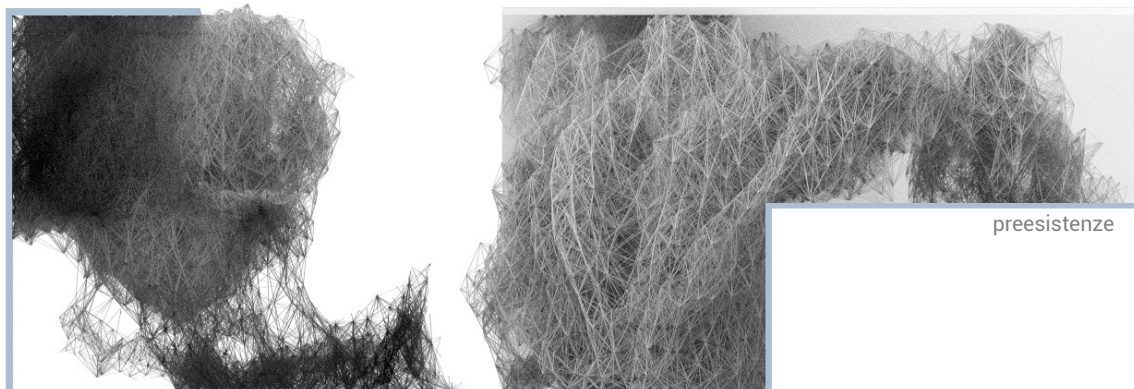
pt. di aggancio



section A-A

pt. di aggancio

pt. di aggancio



section B-B

Nel tentativo di superare le limitazioni delle versioni precedenti (soprattutto per quel che riguarda la scarsa variabilità nello spazio e le difficoltà riscontrate nell'ottenere una tettonica continua) in questa fase sono stati eliminati numerose condizioni al contorno inserite negli step precedenti.

In questo caso quindi in fase di input al sistema sono stati assegnati pochi punti prestabiliti (e poche aree in cui la struttura creata potesse vincolarsi al contesto). Questi start points sono quindi le sole aree in cui la struttura possa vincolarsi al contorno. Così facendo, si sono di fatto indotti gli agenti a sviluppare maggiormente la struttura nello spazio.

Per aumentare la variabilità inoltre, oltre agli agenti standard che iniziano il loro percorso da zone in cui è possibile depositare, sono stati introdotti altri agenti, che partono da zone libere nello spazio finito, ma vengono poi attratti dal materiale depositato, avvicinandosi ad esso fino a partecipare attivamente alla costruzione.

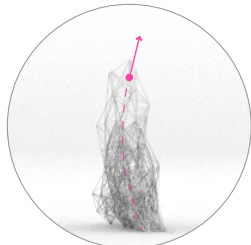
Anche in questo caso dei repulsori sono stati introdotti per garantire il rispetto di determinati spazi e la creazione di vuoti.

Le strutture ottenute in questa versione appaiono sicuramente più articolate delle precedenti, e per certi punti di vista molto più interessanti perchè mettono in evidenza i principi di ottimizzazione derivanti da sistemi auto-organizzanti lavoranti per stigmergia. In questo caso inoltre è possibile osservare la comparsa di strutture continue, che creano grande differenziazione di densità e disposizione dei singoli elementi all'interno della struttura.

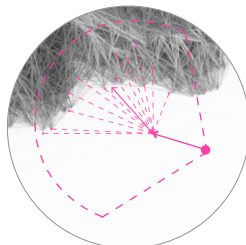
Appare però evidente come la riduzione di alcuni vincoli abbia provocato una estrema libertà nel sistema, che in fase di deposito comporta una notevole diminuzione della possibilità di individuare quelle che sono le direzioni principali dei campi in cui il sistema si trova ad agire. In questo caso quindi diminuisce l'interazione tra sistema ed ambiente, e la complessità acquisita tende talvolta a sfociare in una organizzazione caotica (cosa che invece non succede nel role model studiato, in cui l'ordine morfogenetico è caratteristica fondamentale per l'ottimizzazione strutturale).

INPUT: HA_v3.0

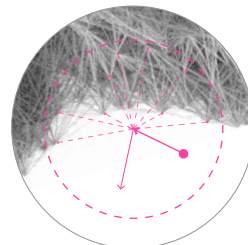
deposito cubico



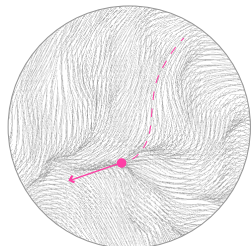
coesione



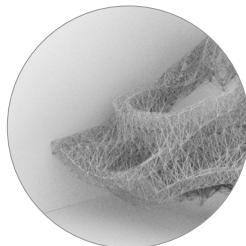
separazione



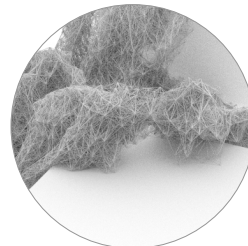
campo vettoriale



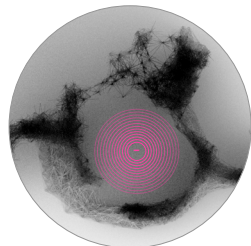
adesione al contesto



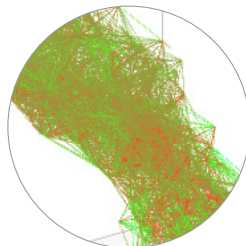
reazione ad ostacoli



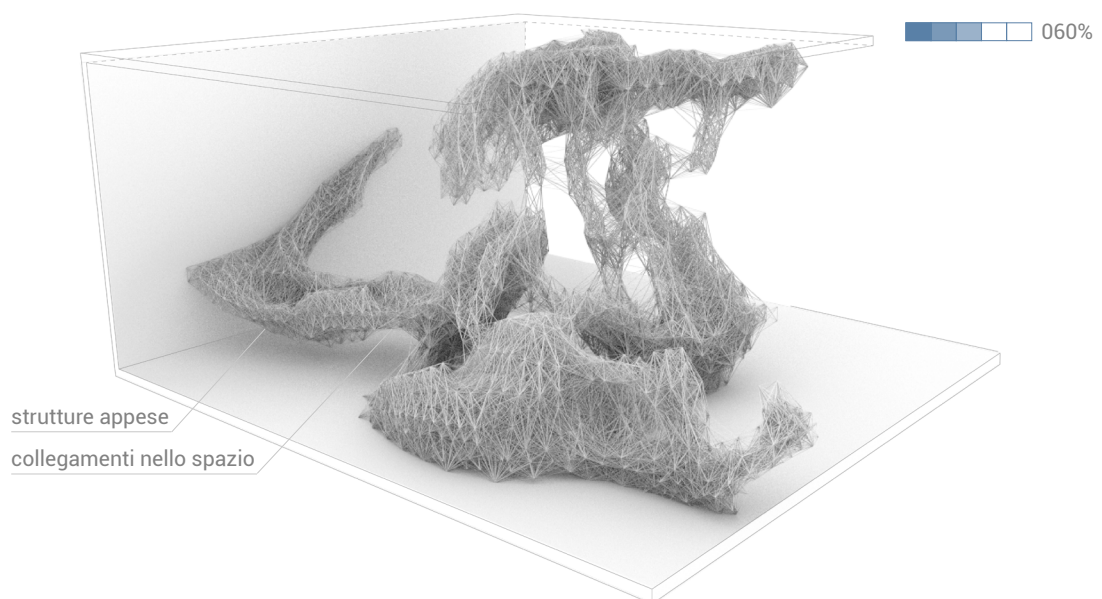
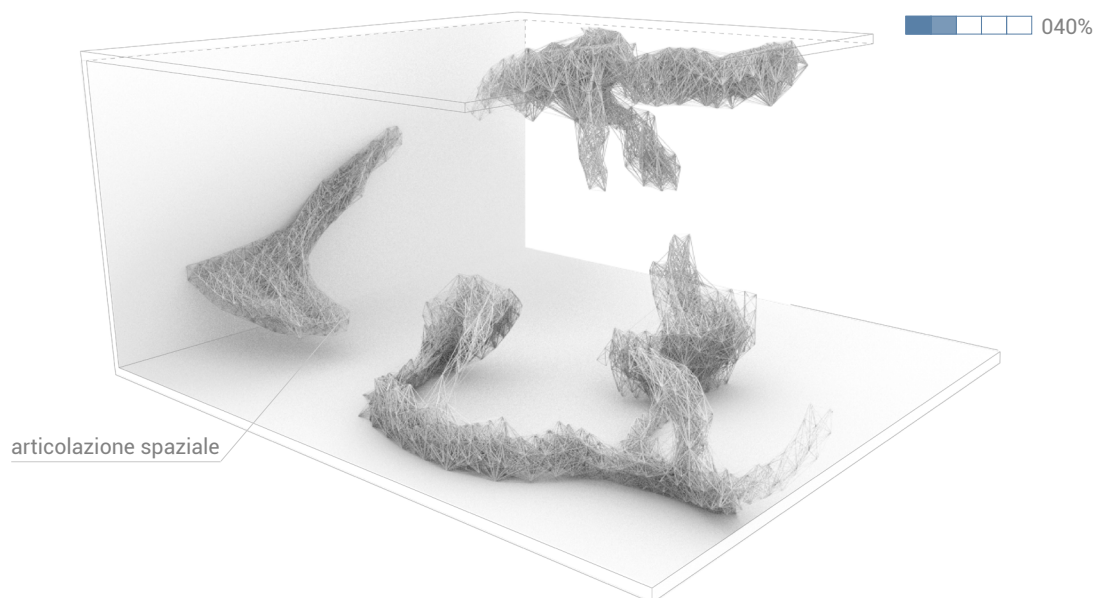
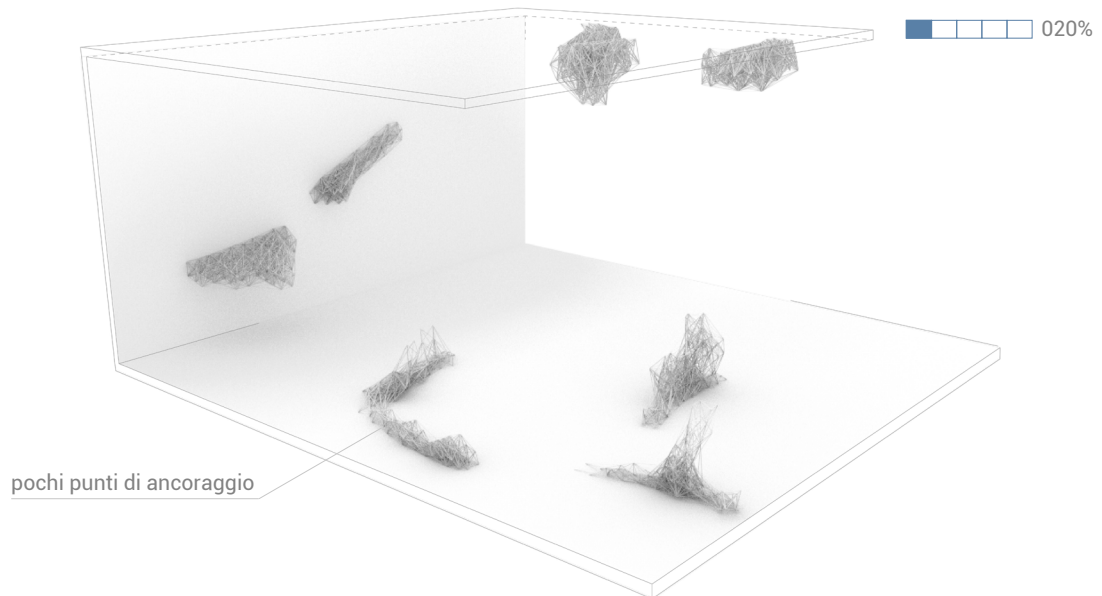
generazione di vuoti

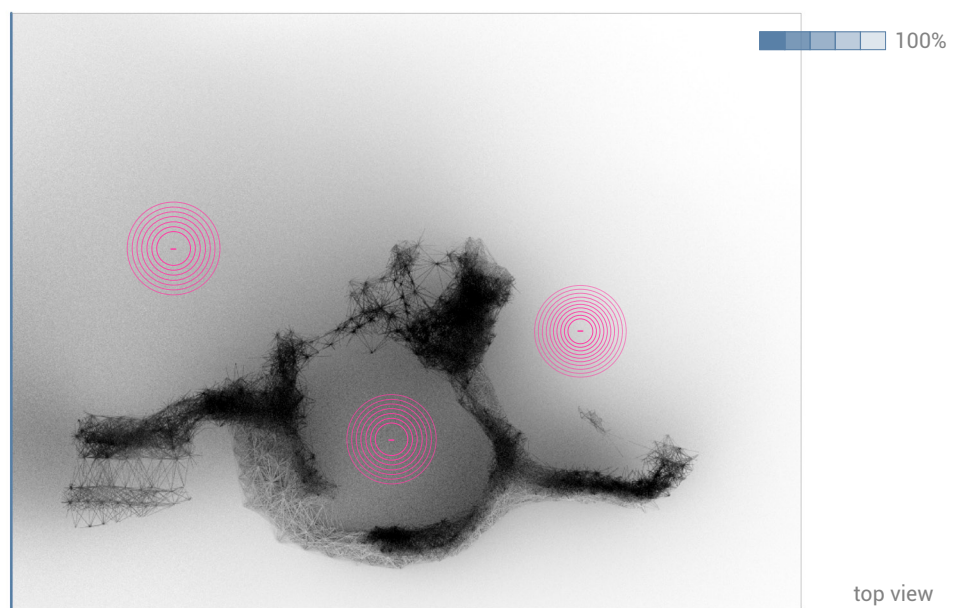
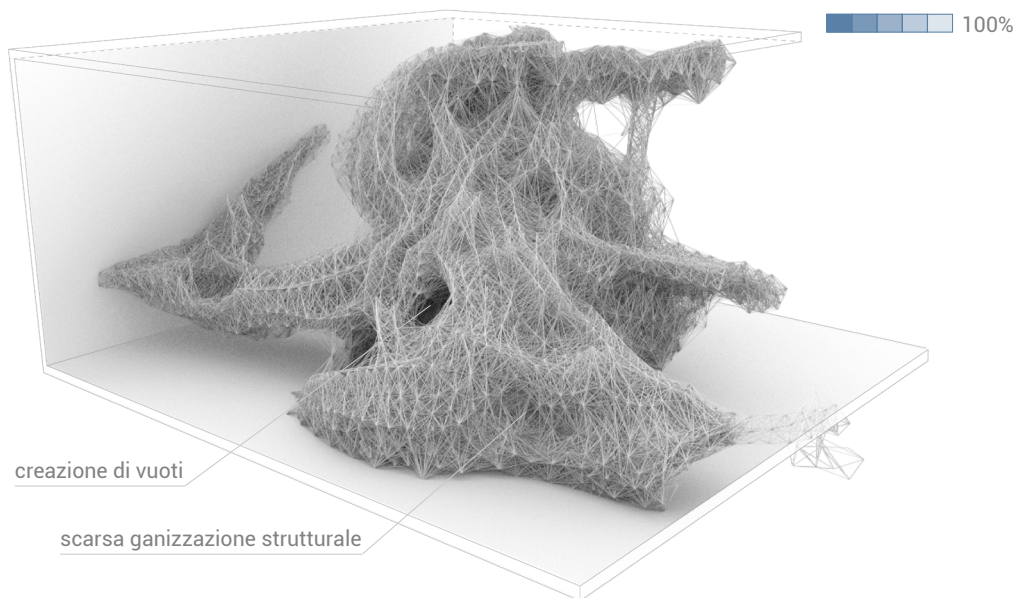
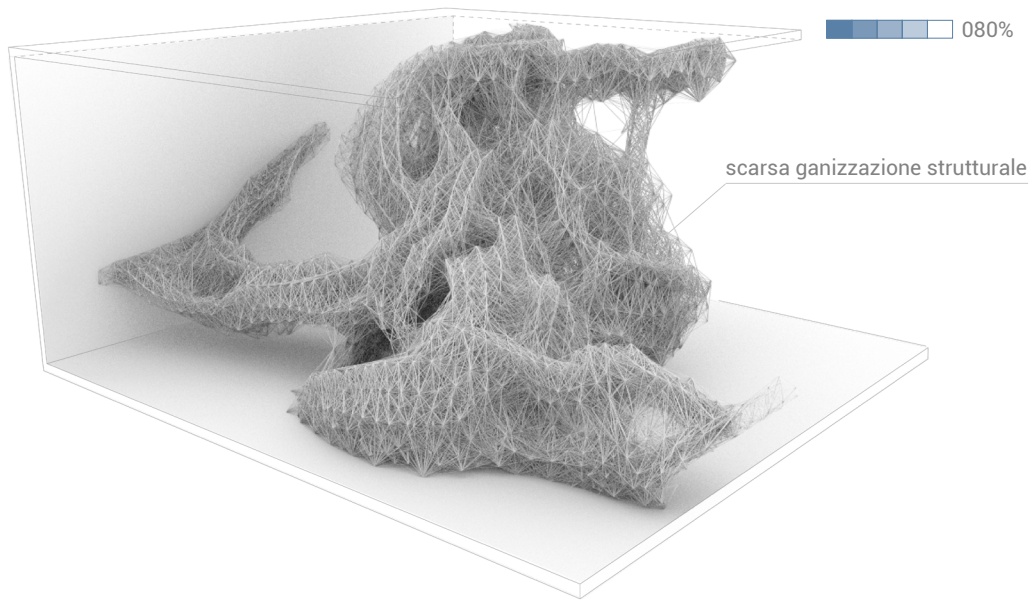


analisi deformativa



Principali fasi dello sviluppo del sistema





Con la versione v4.0 si è fatto un notevole passo avanti rispetto alle precedenti versioni, cercando di lavorare parallelamente sull'organizzazione spaziale e strutturale.

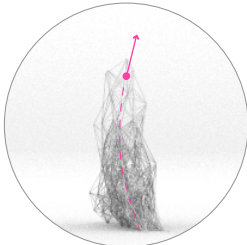
Dal punto di vista dell'organizzazione spaziale, per garantire una continuità di vuoti e di percorsi (in questo caso per lo più verticali) si è scelto di dotare gli agenti della capacità di leggere ed interagire con mesh appositamente inserite nell'ambiente. Per aumentare poi la capacità di interazione agente-ambiente, è stata introdotta per i primi la capacità di lettura e modifica comportamentale di campi scalari (così come in natura le api interagiscono con la temperatura dell'aria).

Dal punto di vista della struttura depositata sono poi state introdotte notevoli innovazioni per quel che riguarda i comportamenti morfogenetici del materiale. Innanzitutto la struttura testata in questo caso è appesa: questo perché dopo numerosi tentativi si è visto che, quando la componente tensionale principale nel sistema globale è la trazione, i singoli elementi tendono a distribuirsi in maniera più ordinata, limitando compenetrazioni ed eccessivi (nonché inutili) livelli di complessità. Inoltre lo sviluppo degli ancoraggi avviene ancora attraverso isovalori di campo; così facendo si ottengono sottostrutture (simili ai favi) prevalentemente bidimensionali (con spessore molto minore delle altre due dimensioni) che permettono una maggiore articolazione globale pur mantenendo ben visibili le direzioni principali. Al fine di simulare al meglio il comportamento dei materiali reali è stata anche introdotta la variazione temporale della rigidità delle springs depositate (che tenderanno quindi a diventare corpi rigidi col passare del tempo). Inoltre, ai fini di ottimizzare la struttura è stato introdotto un continuo controllo della stessa, con rimozione delle springs inutili ed creazione di nuove là dove vengono rilevate eccessive instabilità locali.

Con questo test è stato fatto un discreto passo avanti nella possibilità di applicazione a scale diverse del role model studiato, ottenendo anche una buona interazione tra i comportamenti stigmergici, le capacità di interagire con il contesto e gli input introdotti dal progettista.

INPUT: HA_v4.0

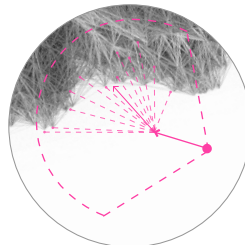
deposito cubico



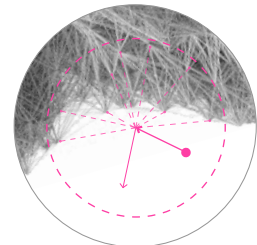
variazione rigidezza



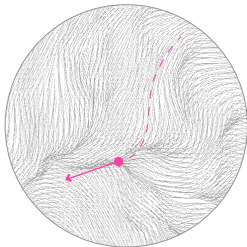
coesione



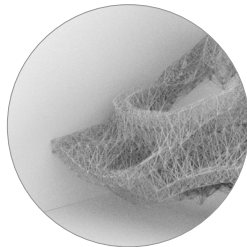
separazione



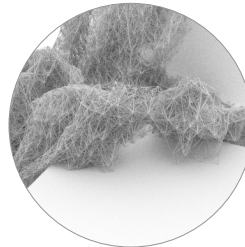
campo vettoriale



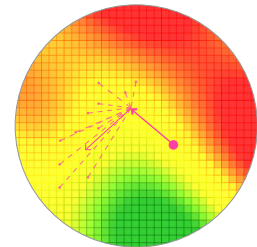
adesione al contesto



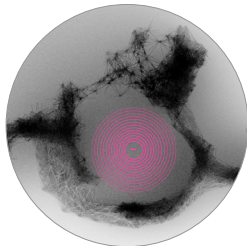
reazione ad ostacoli



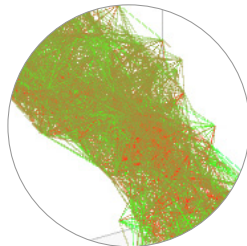
campo scalare



generazione di vuoti

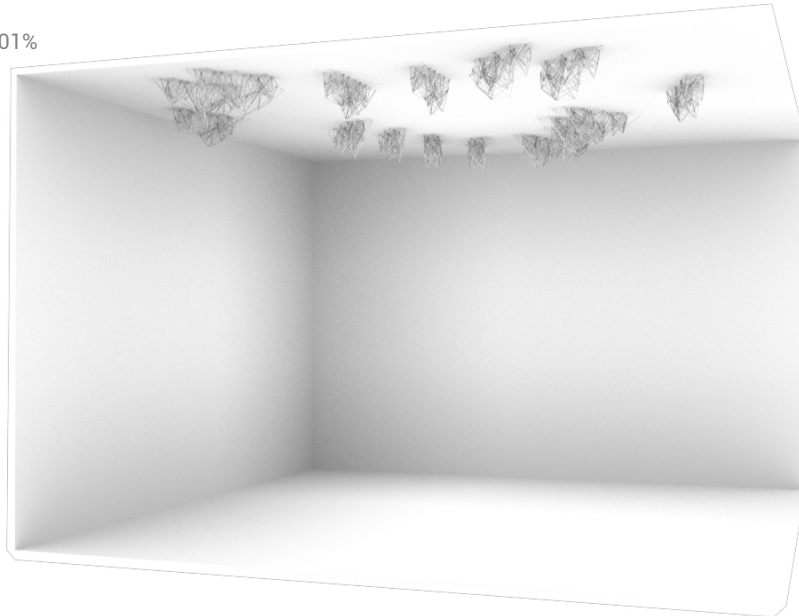


ottimizzazione strutt.

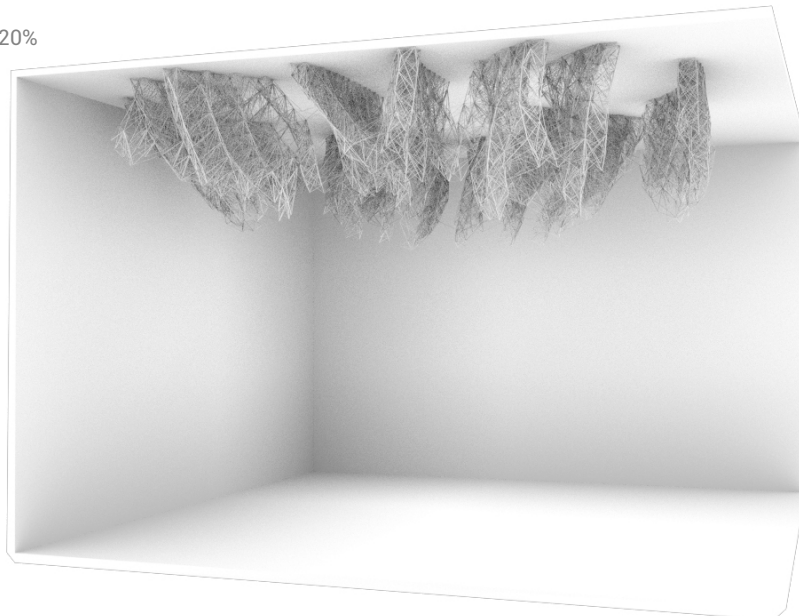


Pagine seguenti: fasi principali dello sviluppo e relative analisi delle deformazioni e delle caratteristiche meccaniche

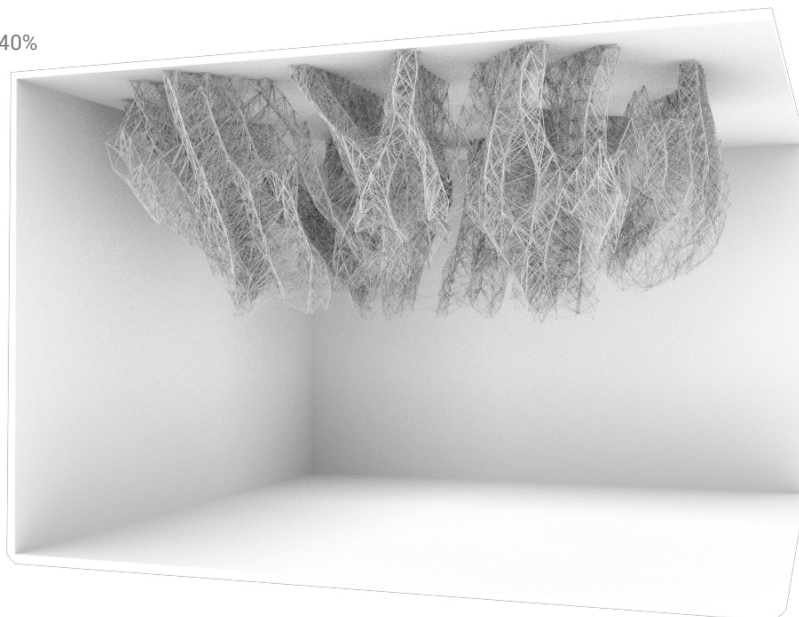
001%



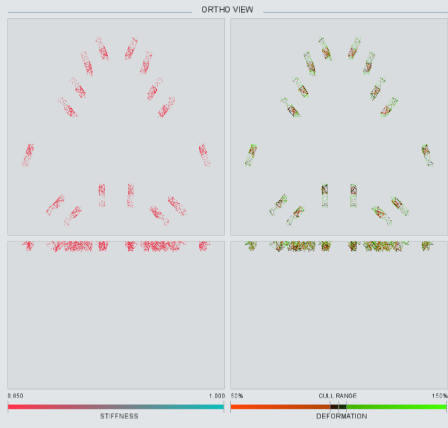
020%



040%



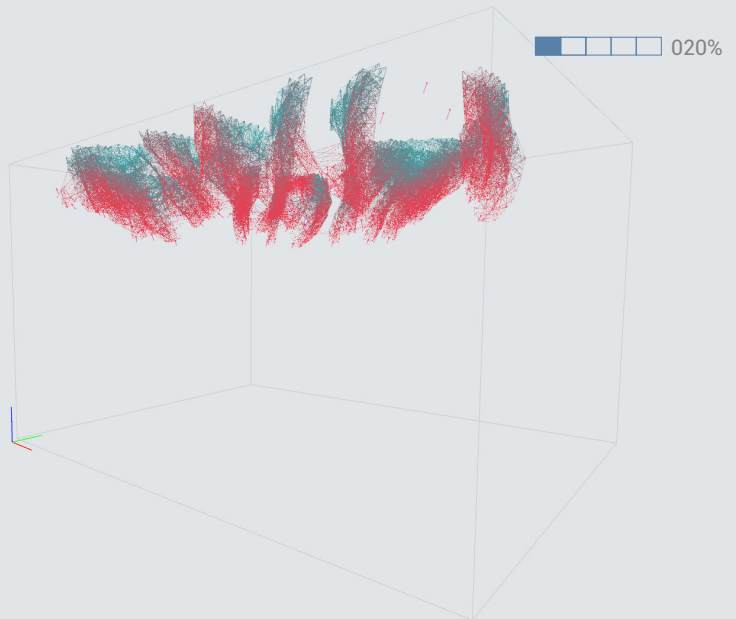
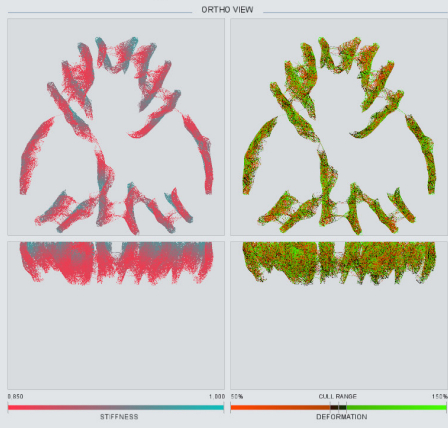
HOMEORHETIC ASSEMBLIES_frameCount: 16 / 400



PROJECT INFO

._AGENTS 49
._PARTICLES 358
._SPRINGS 2149
._SPRINGS LENGTH: (3.0 11.0)

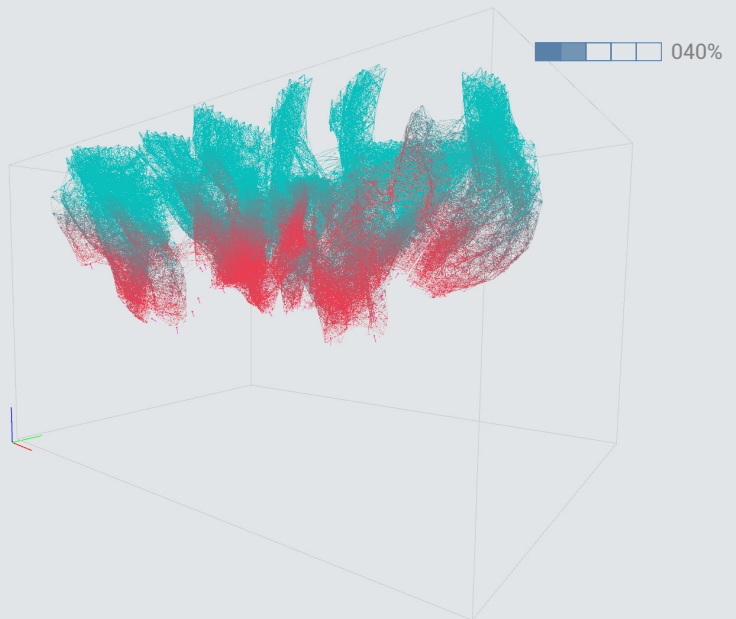
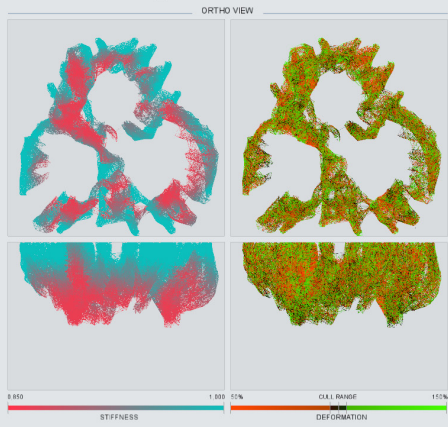
HOMEORHETIC ASSEMBLIES_frameCount: 71 / 400



PROJECT INFO

._AGENTS 117
._PARTICLES 2019
._SPRINGS 3114
._SPRINGS LENGTH: (3.0 11.0)

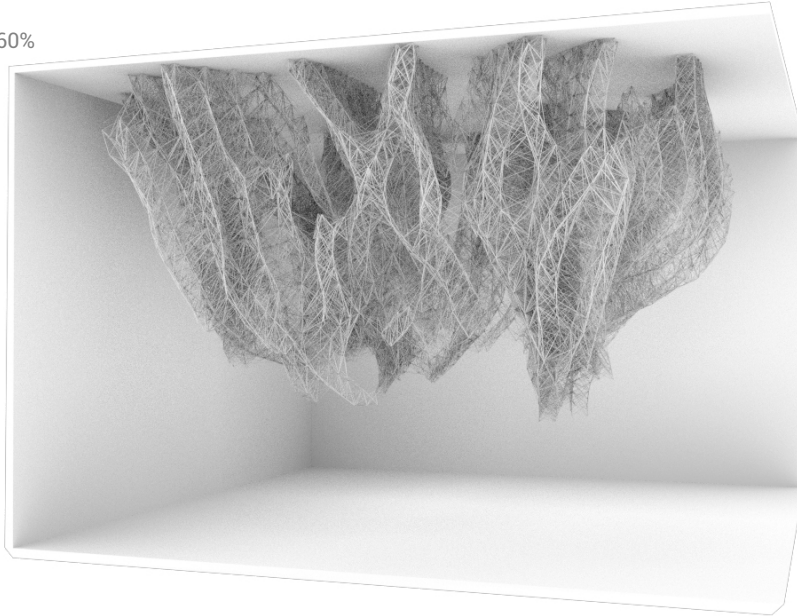
HOMEORHETIC ASSEMBLIES_frameCount: 141 / 400



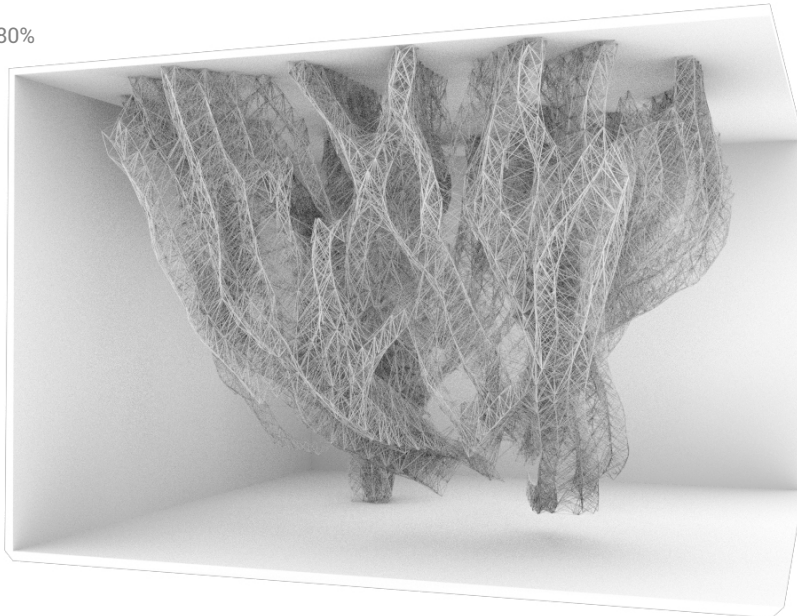
PROJECT INFO

._AGENTS 119
._PARTICLES 527
._SPRINGS 13894
._SPRINGS LENGTH: (3.0 11.0)

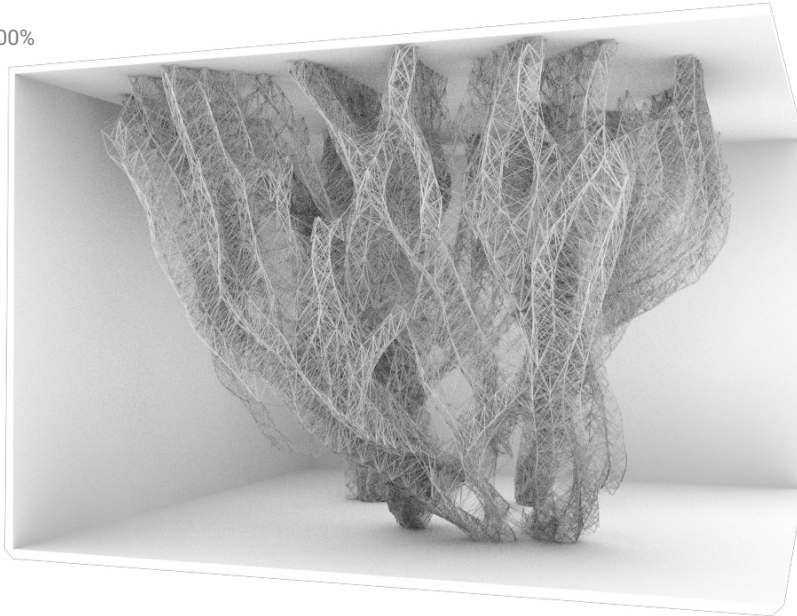
060%



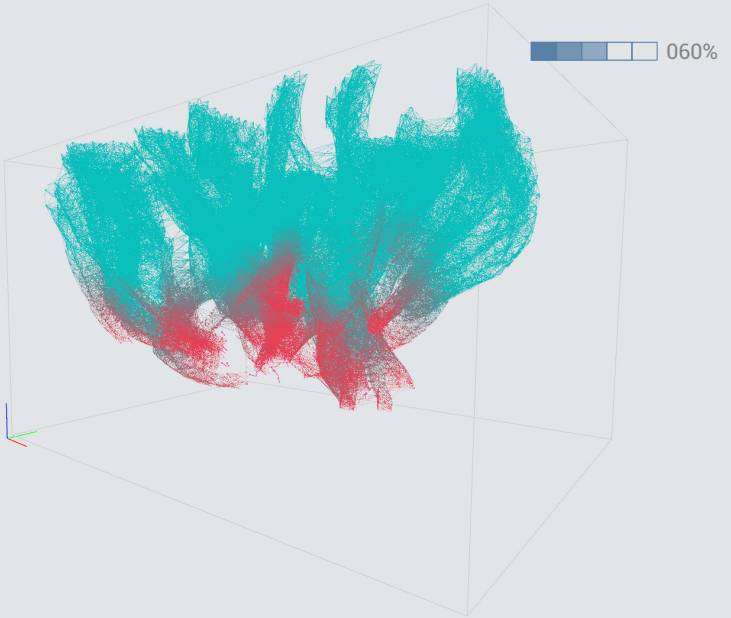
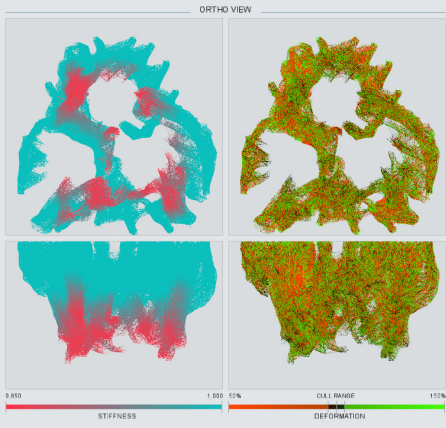
080%



100%



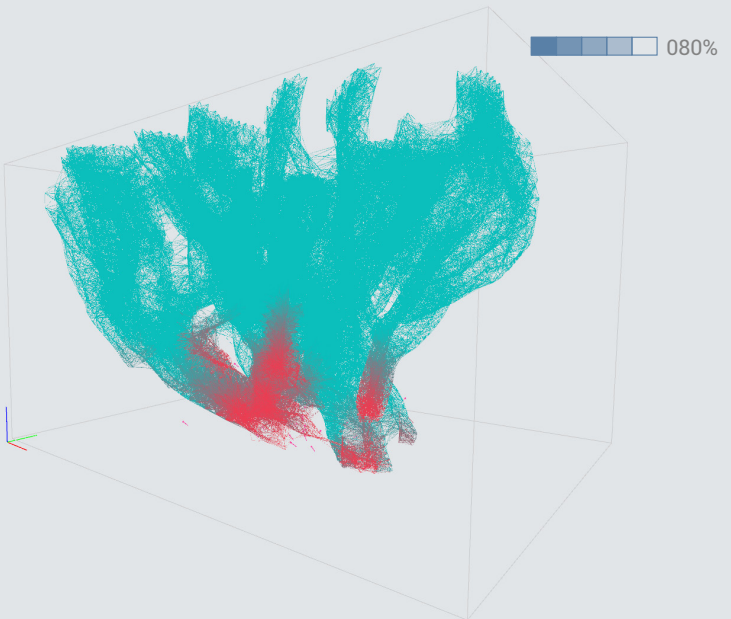
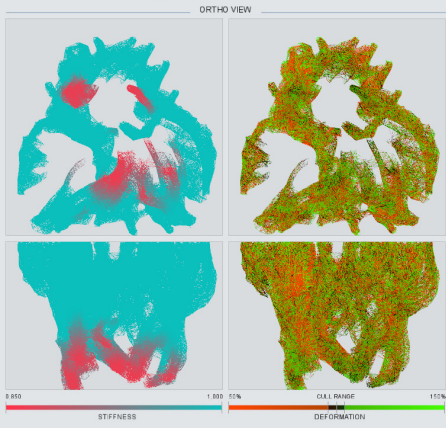
HOMEORHETIC ASSEMBLIES_frameCount: 211 / 400



PROJECT INFO

._AGENTS 118
._PART CLES 8947
._SPRINGS 23829
._SPRINGS LENGTH (3 0 11 0)

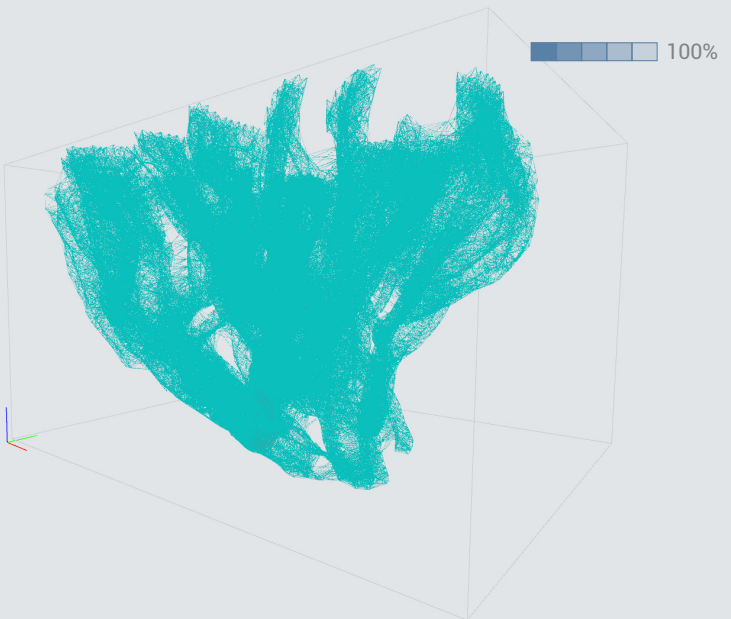
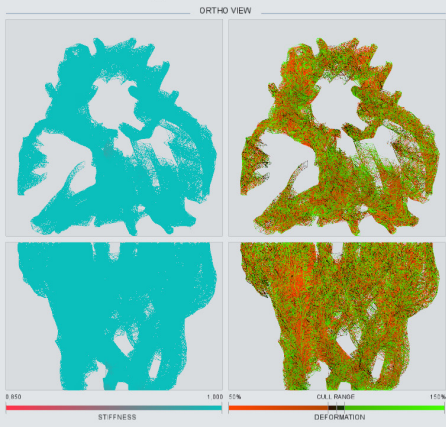
HOMEORHETIC ASSEMBLIES_frameCount: 282 / 400



PROJECT INFO

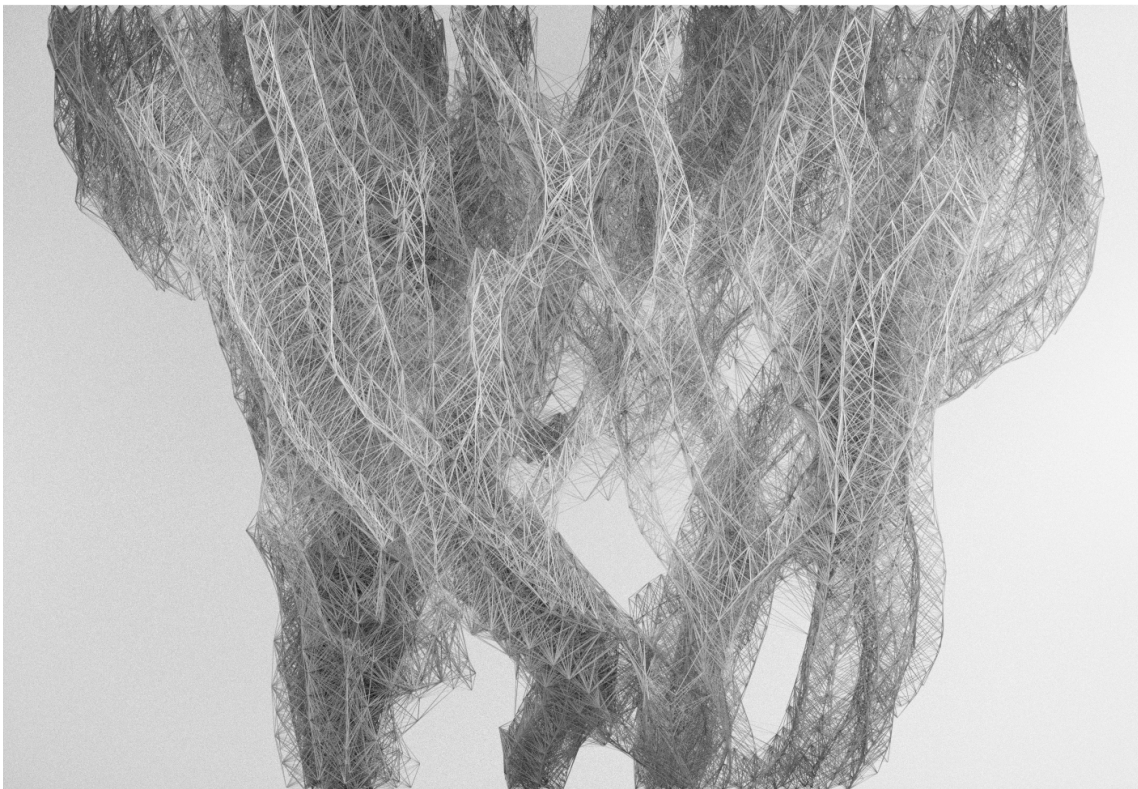
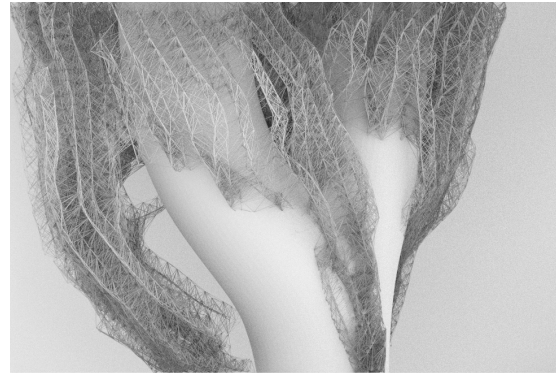
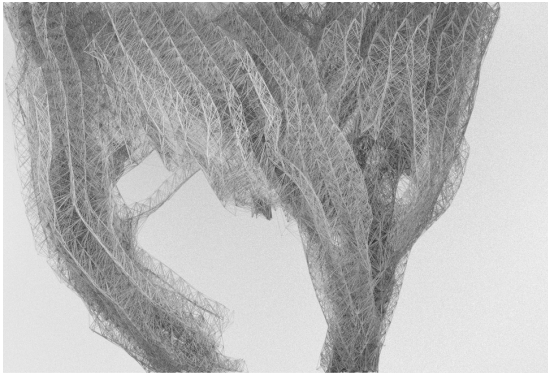
._AGENTS 100
._PART CLES 7095
._SPRINGS 28554
._SPRINGS LENGTH (3 0 11 0)

HOMEORHETIC ASSEMBLIES_frameCount: 402 / 400



PROJECT INFO

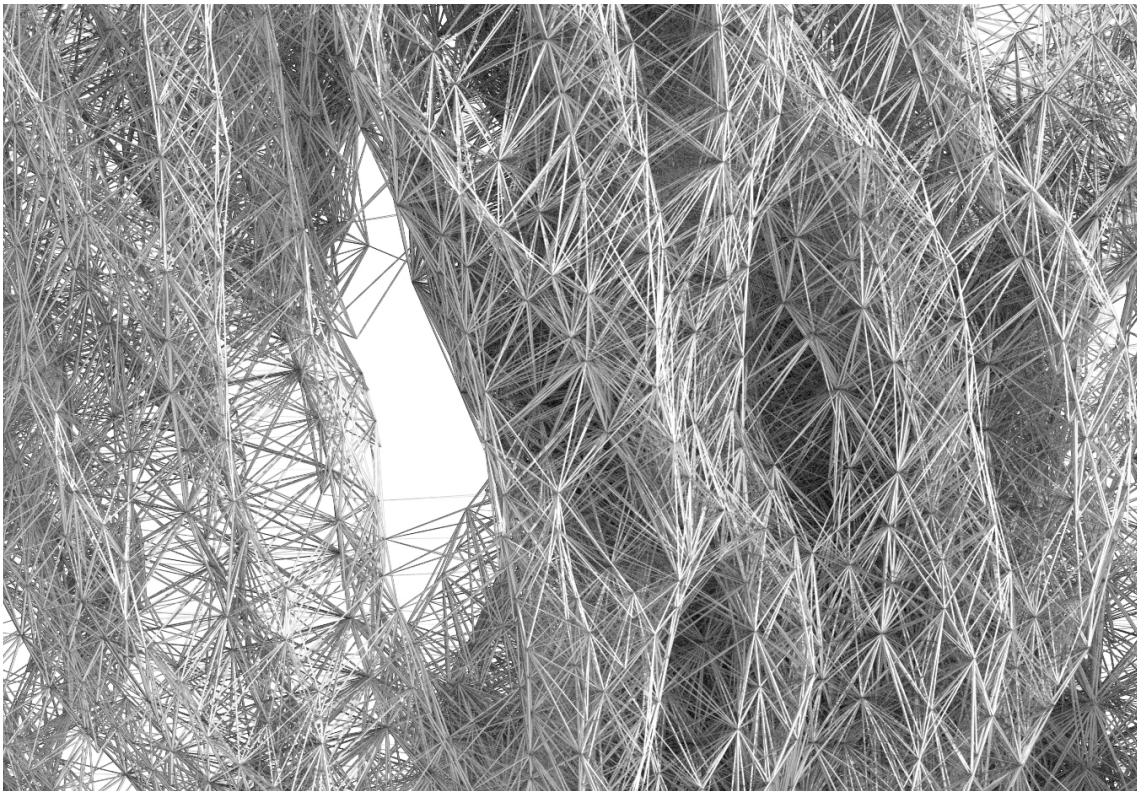
._AGENTS 14
._PART CLES 826
._SPRINGS 27387
._SPRINGS LENGTH (3 0 11 0)



_F1 (alto a sinistra): Vengono riportati un prospetto laterale del risultato ottenuto dalla versione in esame.

_F2 (alto a destra): Lo stesso prospetto viene mostrato in rapporto alla mesh con la quale in fase di simulazione vengono creati gli spazi. In questa versione questi volumi vengono rispettati, ma il sistema non è ancora in grado di seguire morfologie troppo complesse a causa di una limitata capacità di variazione spaziale.

_F3 (sotto): Prospetto frontale della stessa versione.



_F4 (sopra) ed F5 (sotto): Queste due immagini mostrano in dettaglio la struttura generata dall v4.0. In tale struttura emergono le direzioni principali dei flussi, il comportamento emergente (in particolare dovuto alla stigmergia data la concentrazione materiale che si genera), ed una notevole capacità di variazione locale per quanto riguarda la distribuzione degli elementi e la densità degli stessi. Si nota però anche come il numero di connessioni sia probabilmente eccessivamente ridondante, e come ad uno stesso nodo afferisca un numero di springs estremamente elevato.

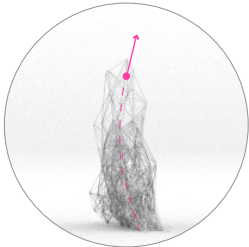
La versione v5.0 altro non è che il completamento di questo percorso riguardante la ricerca tettonica ed architettonica. Con questa versione di fatto vengono introdotti tutti i comportamenti presentati nel capitolo precedente (capitolo 4: Growth process) ed i cui risultati saranno approfonditamente mostrati nel capitolo successivo (capitolo 6: Pavillon project) attraverso una proposta di applicazione pratica.

Con questo ulteriore step sono stati introdotti nel sistema multi agente comportamenti fondamentali (ancora una volta adattati da quelli studiati nel role model di riferimento) che hanno permesso un notevole aumento delle potenzialità architettoniche del sistema. Sistema in cui a priori sono note solo le relazioni locali per i singoli agenti ed il comportamento strutturale generale, mentre gli oggetti e gli eventi emergono in maniera non predeterminata come risultato di queste interazioni nello spazio e nel tempo.

Le strutture così ottenute dall'interazione del multi-agent system e dalle capacità morfogenetiche del materiale presentano un elevato grado di complessità ed efficienza, armonizzando l'aspetto formale con l'organizzazione materica e fisiologica. Questi risultati appaiono estremamente complessi ed eterogenei nella loro organizzazione spaziale e, pur facendo emergere un set di elementi identificabili nella loro specifica singolarità (come ad esempio superfici, pareti, colonne, etc...), generano strutture continue e creano grande differenziazione di densità e di disposizione dei singoli elementi all'interno della struttura. Struttura, che in ogni momento appare stabile ed ottimizzata, grazie ad un continuo controllo della stessa ed alla sua capacità di auto-correggersi in fase di simulazione.

INPUT: HA_v5.0

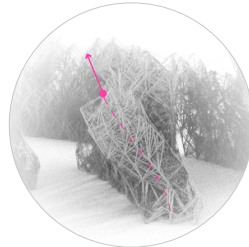
deposito strutturale



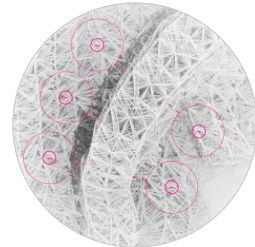
variazione rigidezza



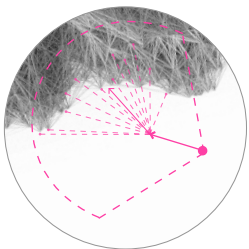
deposito bicubico



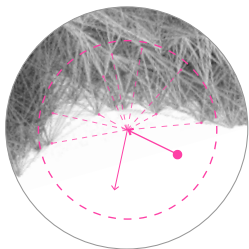
deposito di repulsori



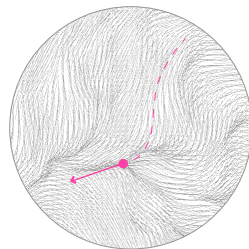
coesione



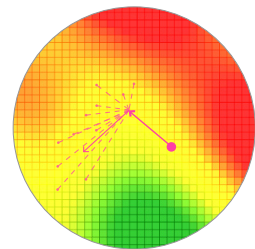
separazione



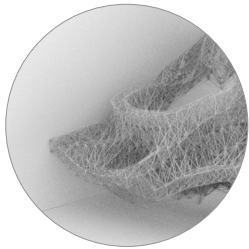
campo vettoriale



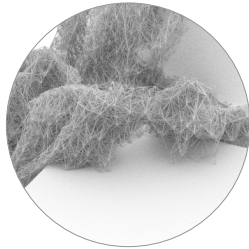
campo scalare



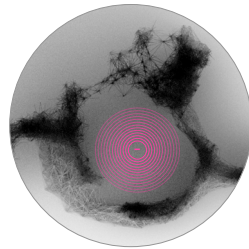
adesione al contesto



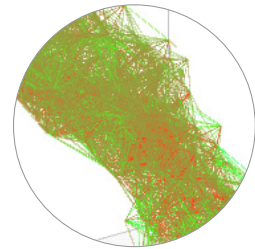
reazione ad ostacoli



generazione di vuoti



ottimizzazione strutt.







applicazione architettonica

"The only way of discovering the limits of the possible is to venture a little way past them into the impossible"

Arthur C. Clarke

APPLICAZIONI

_1: Brian Eno (nato nel 1948), compositore musicale britannico.

_2: Leon Batista Alberti (1404-1472), architetto e teorico dell'architettura descrisse tutte le casistiche relative all'architettura dell'epoca, sottolineando l'importanza del progetto e le diverse tipologie di edifici a seconda della loro funzione.

Nel dare una propria definizione del compositore musicale (ma il concetto è esteso a chiunque svolga un lavoro creativo), Brian Eno¹ esprime un punto di vista estremamente interessante sulla differenza che esiste tra il modo comune di intendere un architetto ed un giardiniere. L'architetto viene definito come qualcuno che ha ben chiaro in mente l'opera che andrà a realizzare, mentre il giardiniere viene definito come qualcuno partendo da un'idea molto generica, prepara le condizioni ambientali, pianta i semi ed aspetta di vedere cosa crescerà esattamente. Eno finisce quindi affermando che attualmente chi svolge un lavoro creativo è spesso più vicino al concetto di giardiniere piuttosto che quello di architetto, e che in futuro la metafora del compositore-architetto (intesa nella accezione di autorialità introdotta da Leon Batista Alberti²) sarà vista come una fase storica transitoria, così come lo sono state quelle precedenti.

In questo capitolo si mostra come, la ricerca fin qui esposta ed il sistema codificato precedentemente spiegato possano trovare riscontro e mostrare le loro potenzialità anche a scale diverse da quella del role model studiato.

Obiettivo di questa ricerca era dimostrare le potenzialità di sistemi auto organizzanti che lavorano per stigmergia, ed in questo capitolo viene mostrata una delle svariate applicazioni architettoniche che possono emergere dal sistema codificato. Verrà quindi presentato un percorso di sintesi, con il quale si mostrerà come logiche di tipo top-down e di tipo bottom-up possano coesistere. In questo percorso si mostrerà innanzitutto il contesto, inteso in questo caso come ambiente finito anisotropo teorizzato dal progettista, e le sue caratteristiche fondamentali. Da qui si passerà poi alla definizione delle condizioni al contorno (imposte sia dal contesto sia dal progettista). Questi input iniziali per metteranno lo sviluppo del sistema multi agente, di cui verranno mostrati i frame fondamentali, e che genererà una struttura continua, caratterizzata da differenziazioni formali e di densità strutturale, il cui valore finale sarà maggiore della somma dei contributi delle singole componenti.

Per dimostrare le potenzialità del sistema multi agente studiato si è scelto di ipotizzare uno spazio finito anisotropo in cui eseguire la simulazione. Per rendere maggiormente leggibile le morfologie e le funzionalità emergenti da questo sistema si è scelto di introdurre un'ulteriore semplificazione, ovvero una simmetria polare rispetto al piano XY di tutti gli input necessari.

Innanzitutto si è dato alla struttura la possibilità di vincolarsi solo al piano superiore ed inferiore del bounding box. Dopodiché sono state individuate due traiettorie, polar simmetriche, attorno alle quali è stata costruita la mesh rappresentante gli spazi da rispettare, e da lasciare vuoti. Così facendo si sono quindi imposti i volumi fondamentali per la generazione del padiglione.

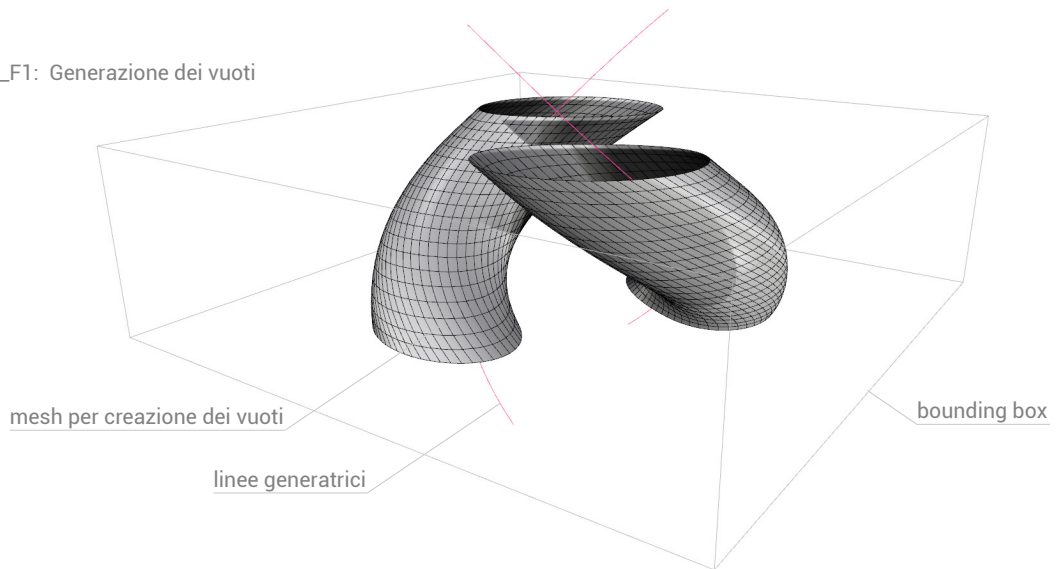
Per simulare poi la presenza di un contesto reale sono stati introdotti fattori di anisotropicità. Questi fattori, come già spiegato nei capitoli precedenti, simulano quello che in natura svolgono le correnti aeree (rappresentate attraverso un campo vettoriale che influisce sulle direzioni di sviluppo globale) e le variazioni di temperatura (rappresentate da un campo scalare che influisce sulla possibilità del deposito oltre ad indurre a costruire lungo zone a bassa variazione termica).

Infine, sono stati individuati i punti iniziali da cui far partire i primi agenti e dai quali inizierà a prendere forma la struttura, che poi si svilupperà in verticale realizzando favi stabili in ogni istante della simulazione, e creando variazioni spaziali e di densità.

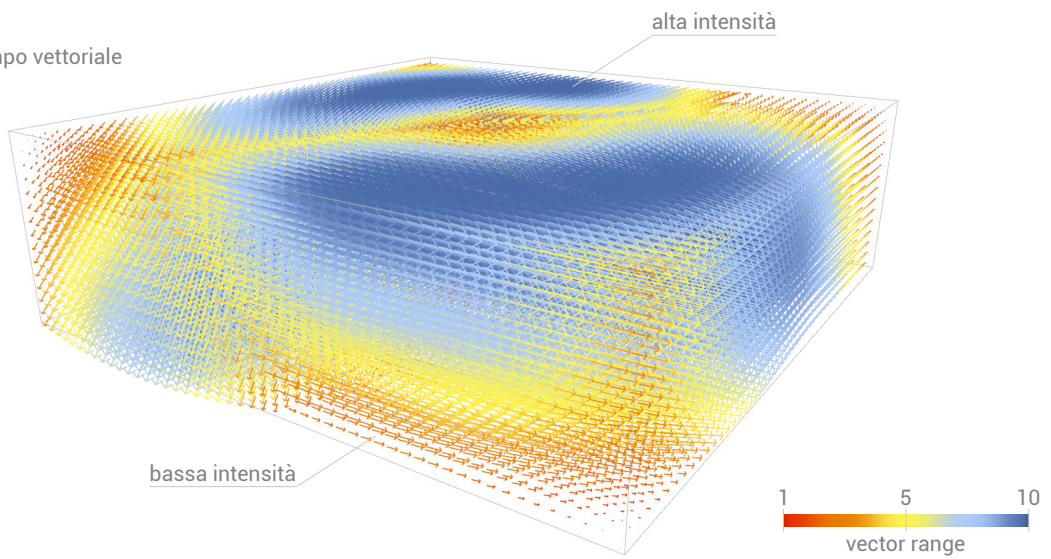
_F1, F2, F3 (pagina a fianco):
Schematizzazione grafica delle principali caratteristiche dell'ambiente teorizzato e delle condizioni al contorno introdotte a fini progettuali.

_da F4 a F15 (pagine seguenti): Sono mostrati gli step principali del processo di sviluppo affiancati dall'analisi delle caratteristiche meccaniche e delle deformazioni.

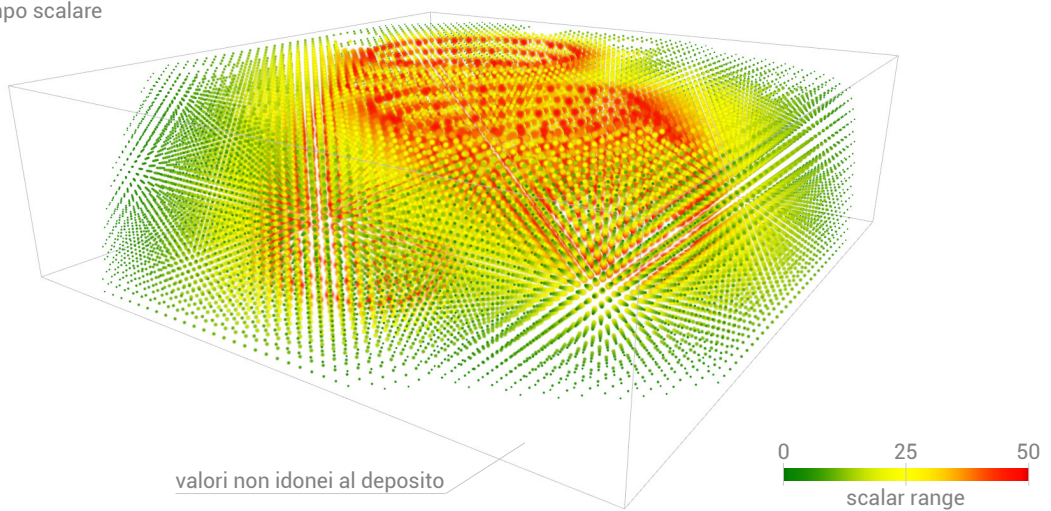
_F1: Generazione dei vuoti



_F2: Campo vettoriale



_F3: Campo scalare



CRESCITA DEL SISTEMA

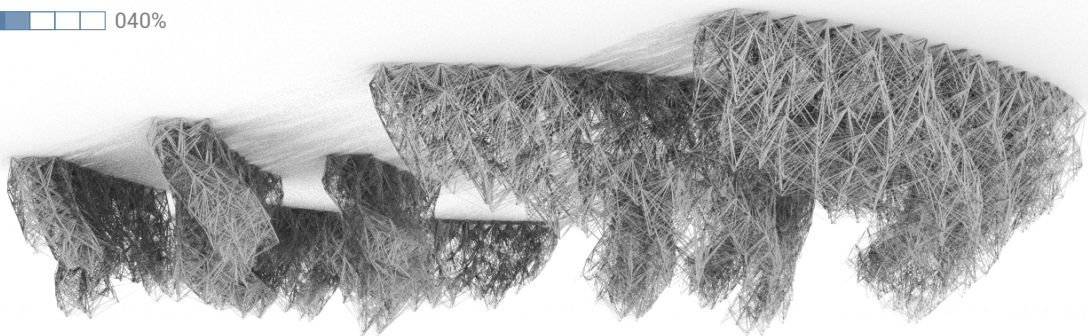
001%



020%

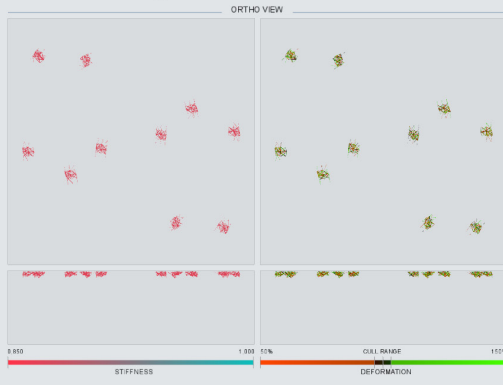


040%

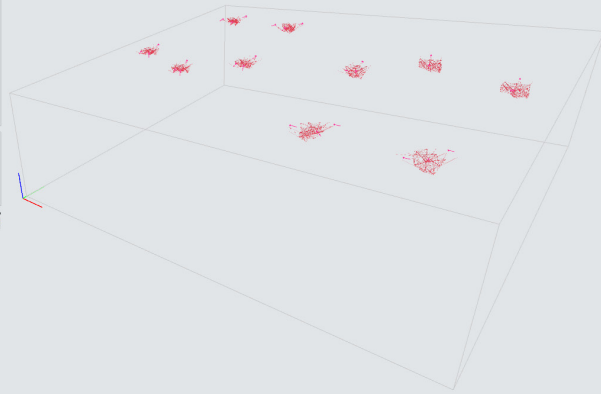


Analisi delle deformazioni e delle caratteristiche meccaniche

HOMEORHETIC ASSEMBLIES_frameCount: 11 / 350



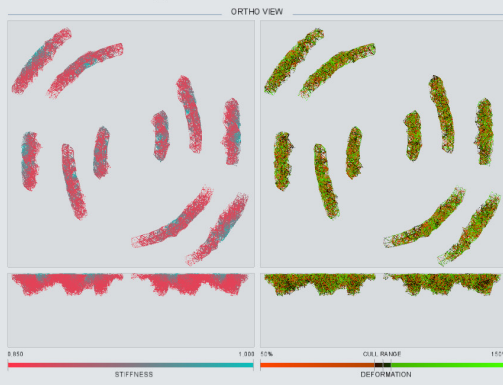
001%



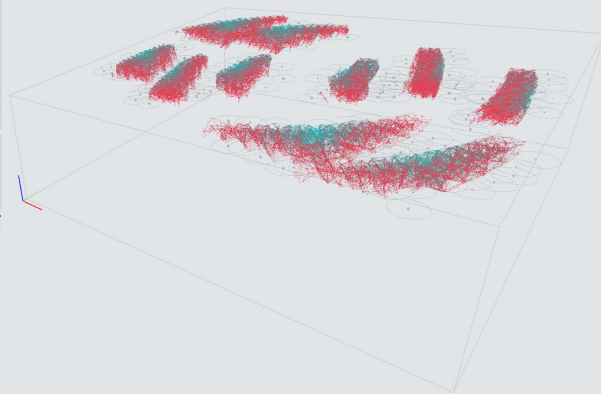
PROJECT #F 0

_AGENTS 30
_PARTICLES 207
_SPRINGS 1410
_SPRINGS LENGTH: (4 0 0 0)

HOMEORHETIC ASSEMBLIES_frameCount: 58 / 350



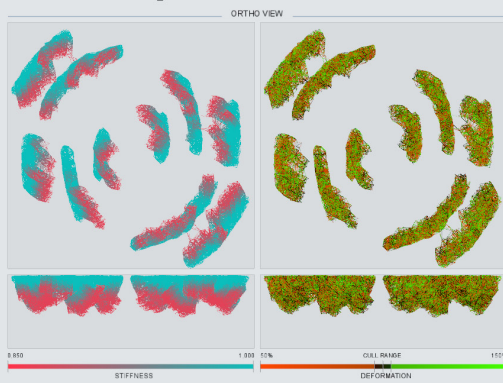
020%



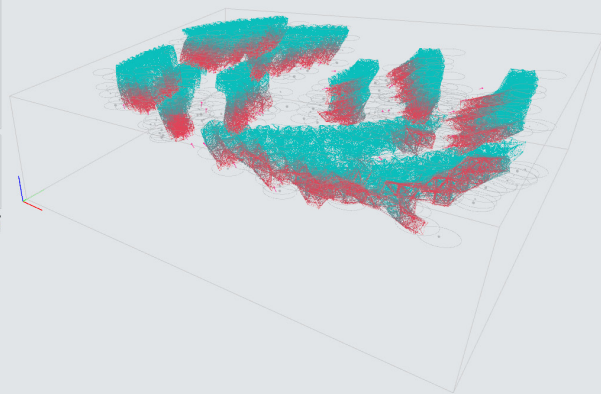
PROJECT #F 0

_AGENTS 90
_PARTICLES 1480
_SPRINGS 8728
_SPRINGS LENGTH: (4 0 0 0)

HOMEORHETIC ASSEMBLIES_frameCount: 116 / 350

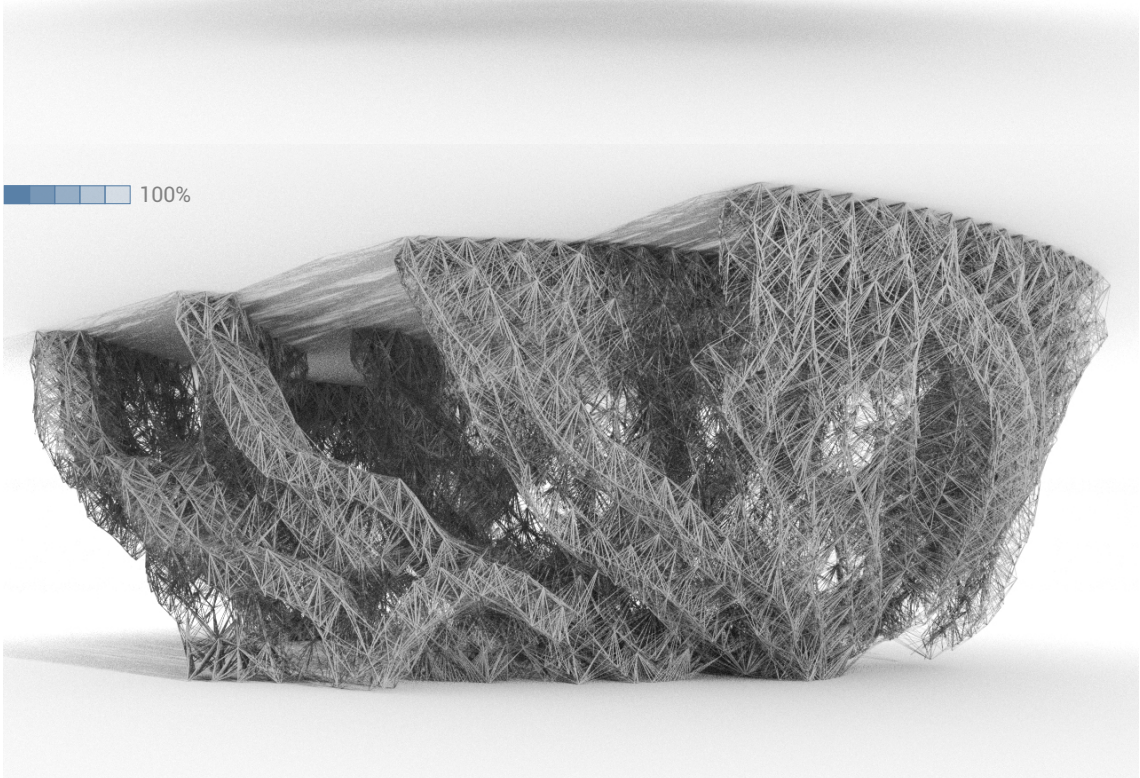
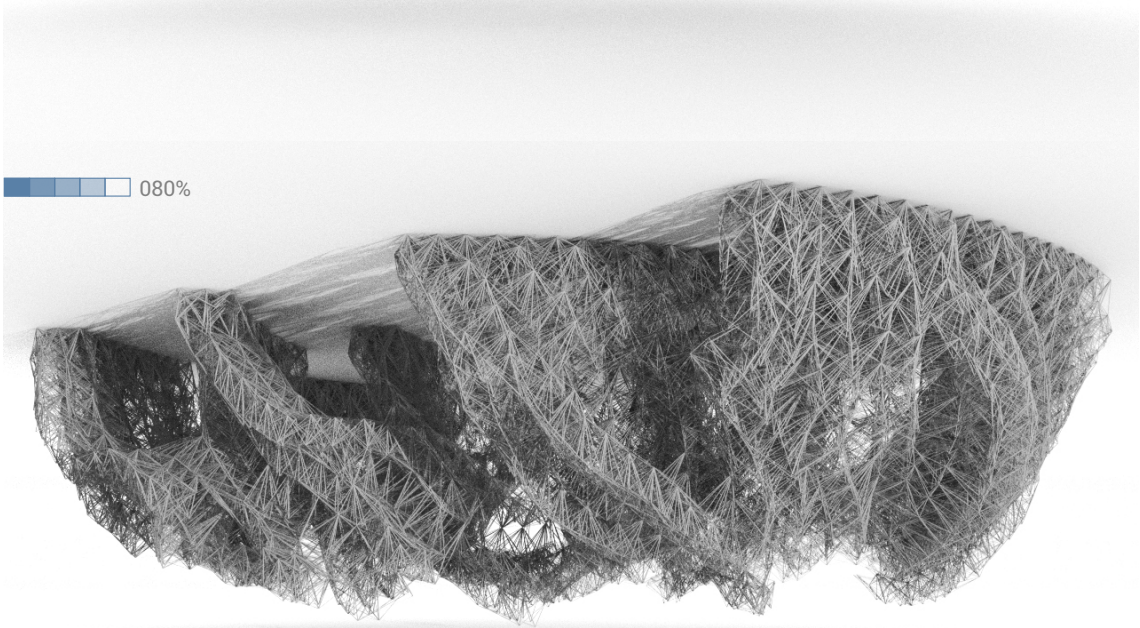
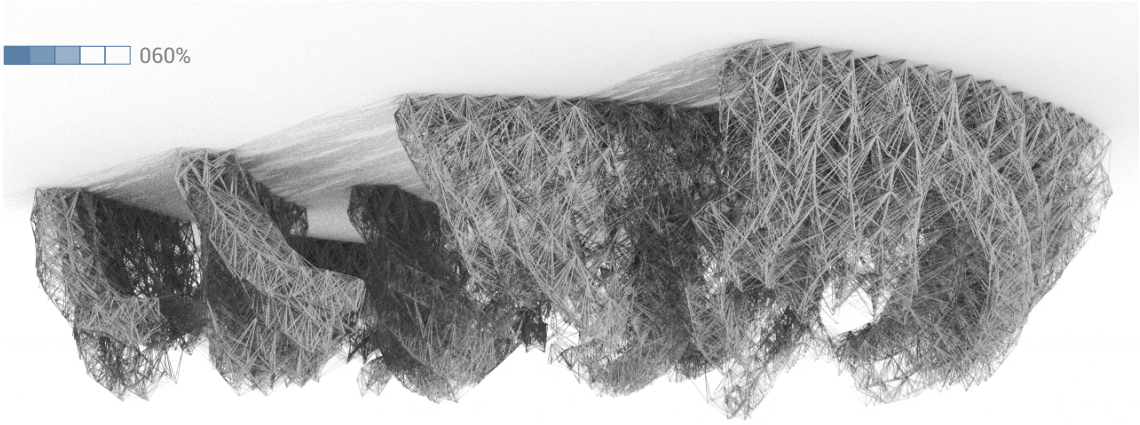


040%

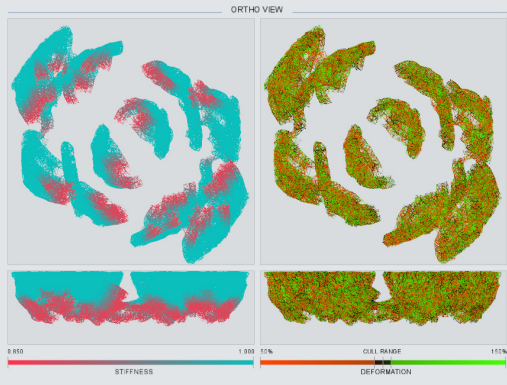


PROJECT #F 0

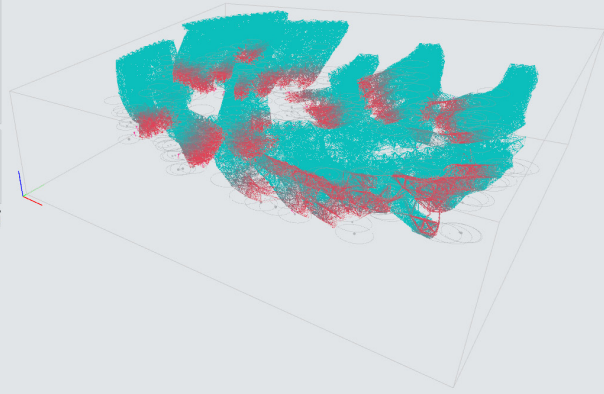
_AGENTS 99
_PARTICLES 3214
_SPRINGS 11891
_SPRINGS LENGTH: (4 0 0 0)



HOMEORHETIC ASSEMBLIES_frameCount: 176 / 350



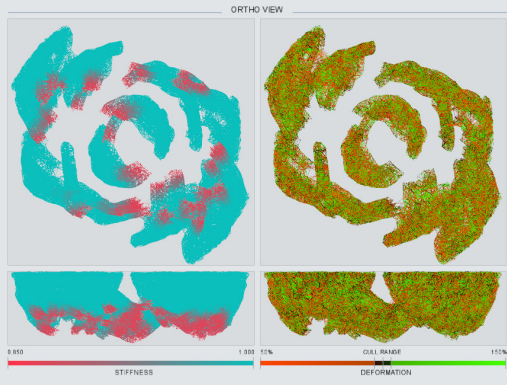
060%



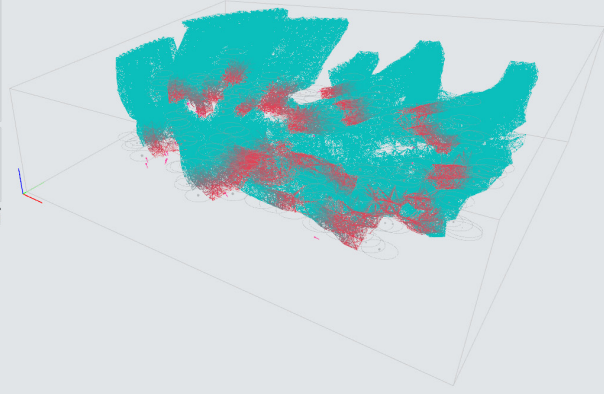
PROJECT #F 0

._AGENTS 89
._PART_CLES 4993
._SPRINGS 13164
._SPRINGS_LENGTH {4 0 0 0}

HOMEORHETIC ASSEMBLIES_frameCount: 236 / 350



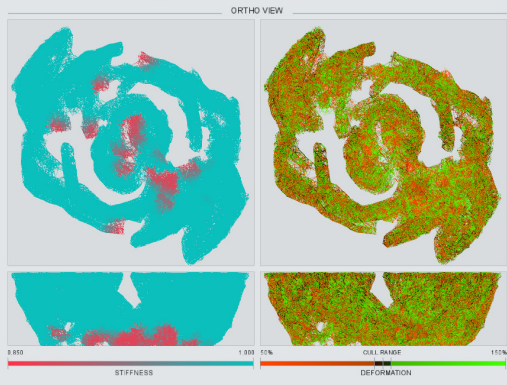
080%



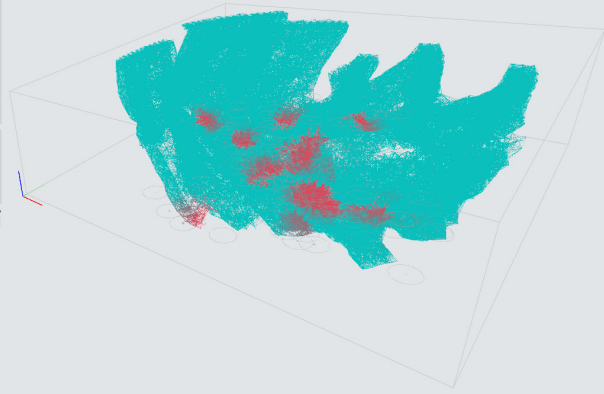
PROJECT #F 0

._AGENTS 95
._PART_CLES 8246
._SPRINGS 22785
._SPRINGS_LENGTH {4 0 0 0}

HOMEORHETIC ASSEMBLIES_frameCount: 352 / 350



100%



PROJECT #F 0

._AGENTS 43
._PART_CLES 7289
._SPRINGS 27840
._SPRINGS_LENGTH {4 0 0 0}

VISUALIZZAZIONE DEL PROGETTO

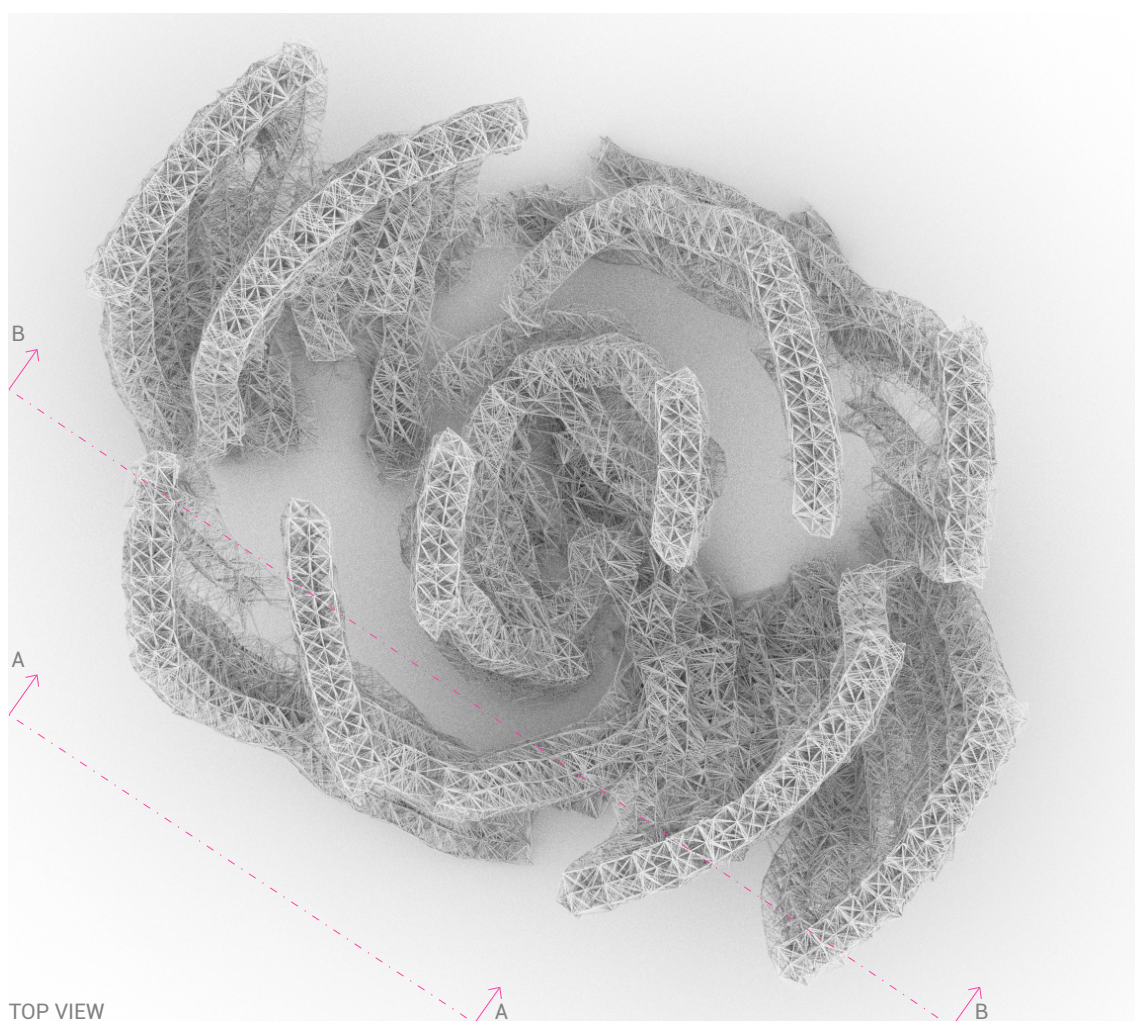
Di seguito si riportano alcune visualizzazioni schematiche che descrivono la struttura ottenuta, le sue dimensioni, il rapporto con l'utilizzatore e con le traiettorie da cui si è generata.

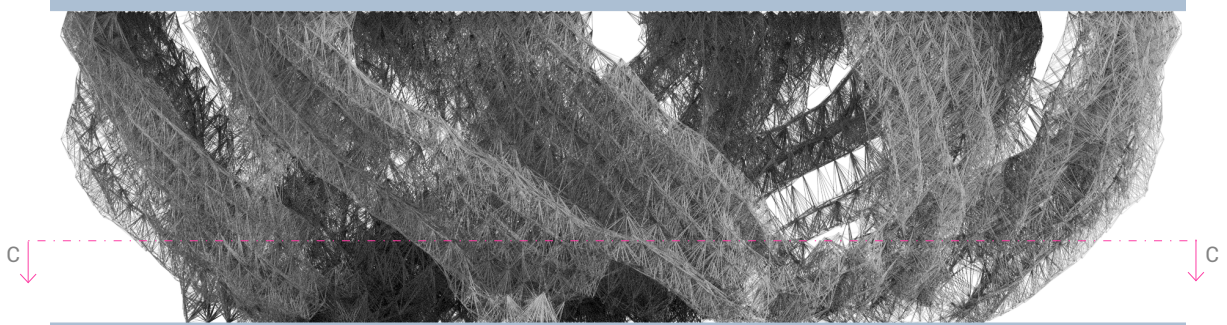
Si noti come il sistema auto organizzante codificato produca una morfologia non prevedibile esattamente a priori, e, seppur applicato a scala ridotta, faccia emergere peculiarità estremamente interessanti da un punto di vista architettonico (come nicchie, aperture etc....).

Il risultato derivante processo esposto è quindi una struttura complessa, ridondante e matericamente organizzata, caratterizzata da una tettonica continua ed in grado di generare anche una buona continuità spaziale. I singoli elementi strutturali poi, tutti uguali per forma e materiale assumono valenza diversa a seconda della posizione, generando anche gradienti di densità visiva e di permeabilità.

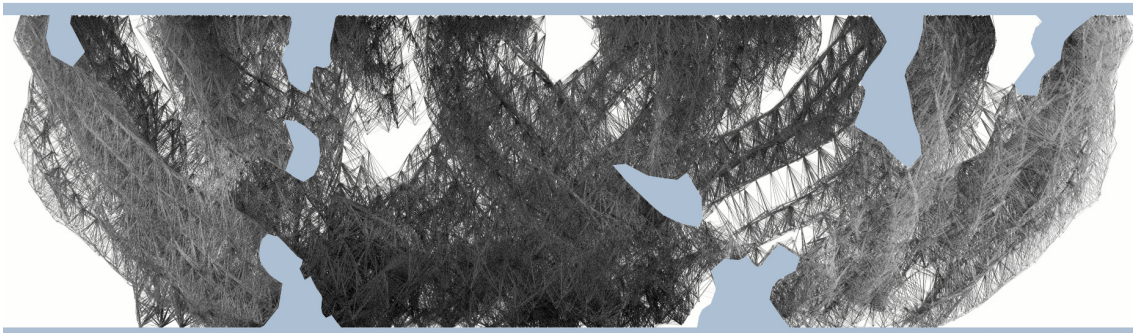
_F16 (sotto), F17-F19 (pagina a fianco):
Piante prospetti e sezioni del padiglione.

_F18-F20(pagine seguenti):
Viste prospettive (di insieme e di dettaglio) del padiglione, in cui sono visibili le variazioni di densità e di volumetria della struttura.

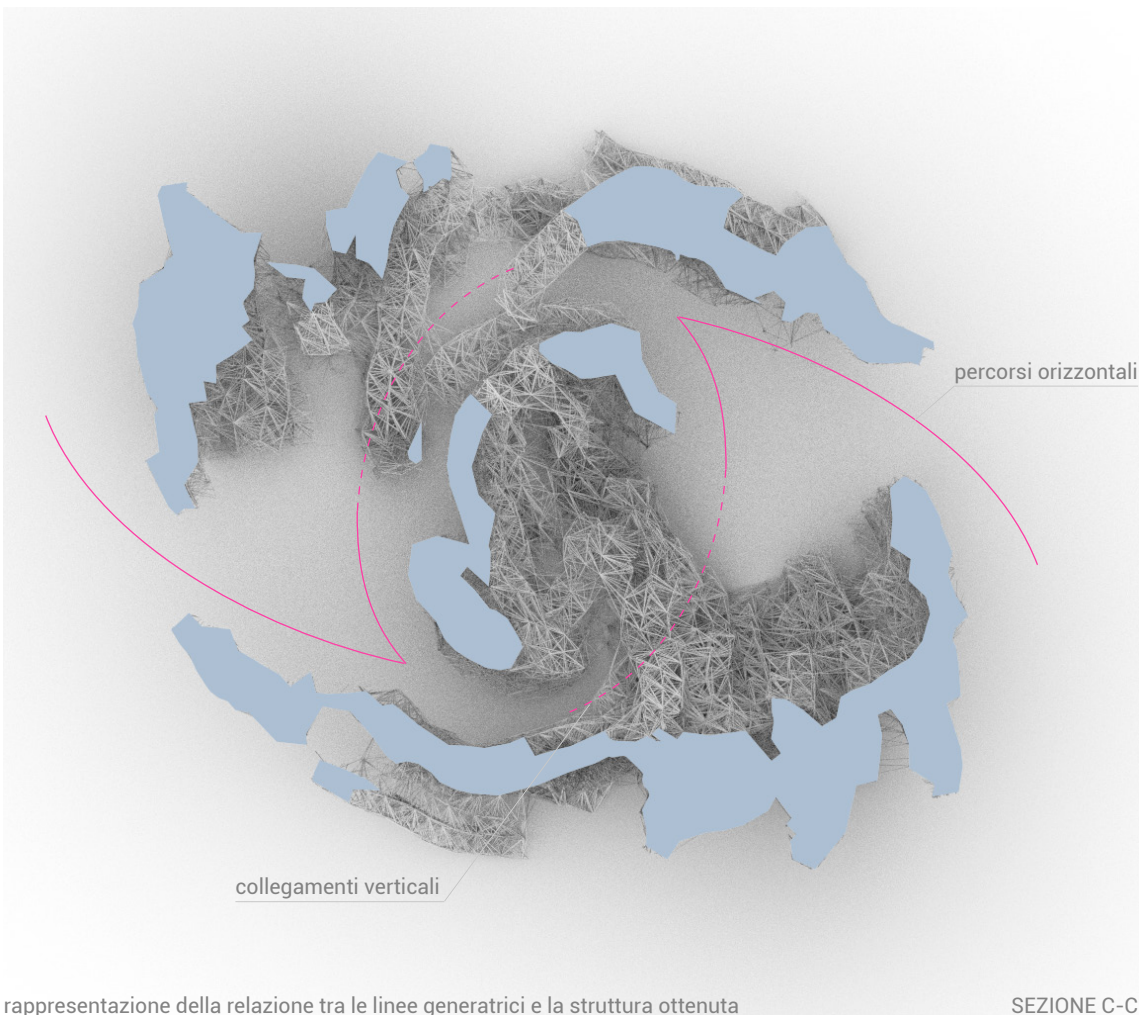




SEZIONE A-A

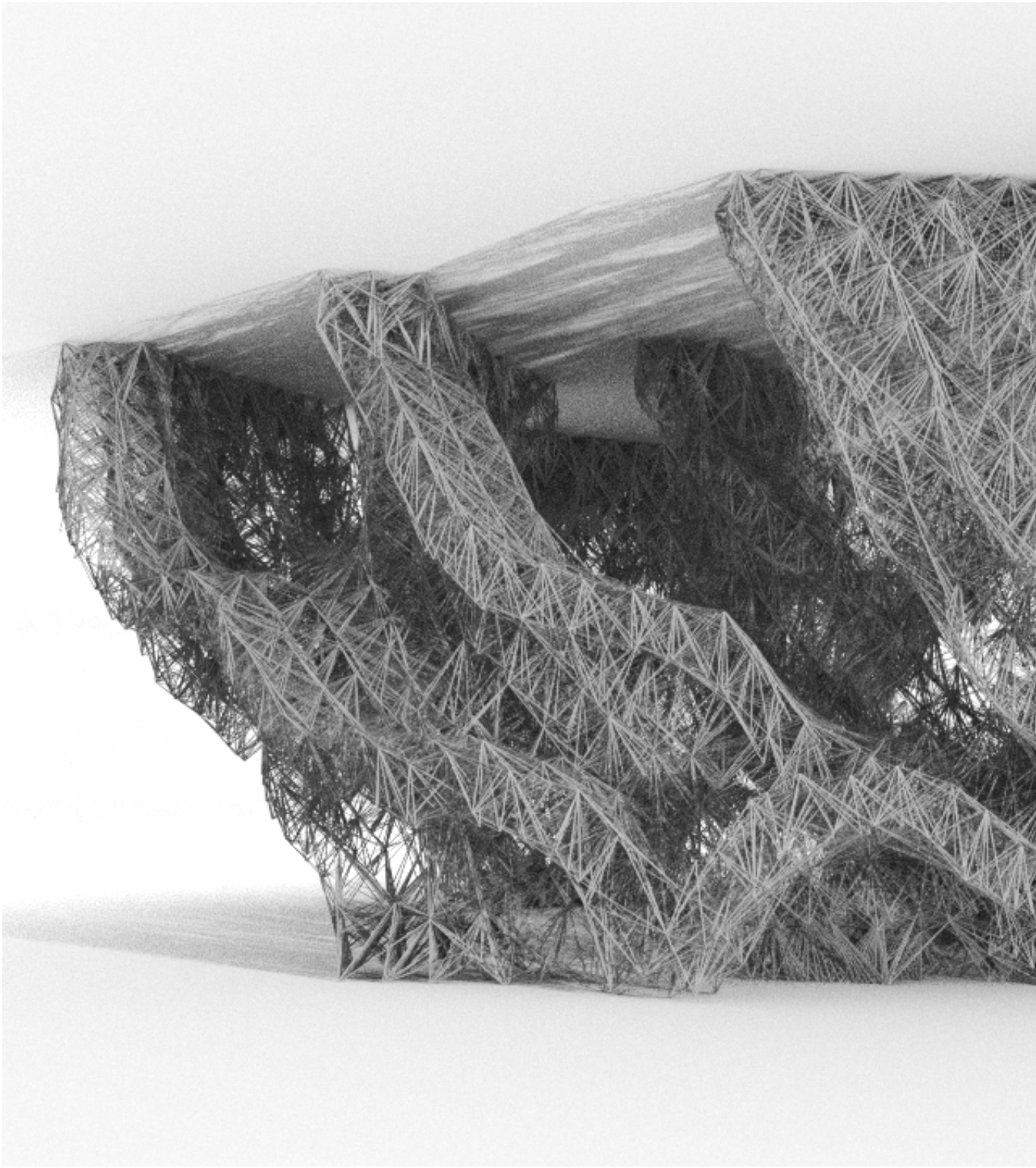


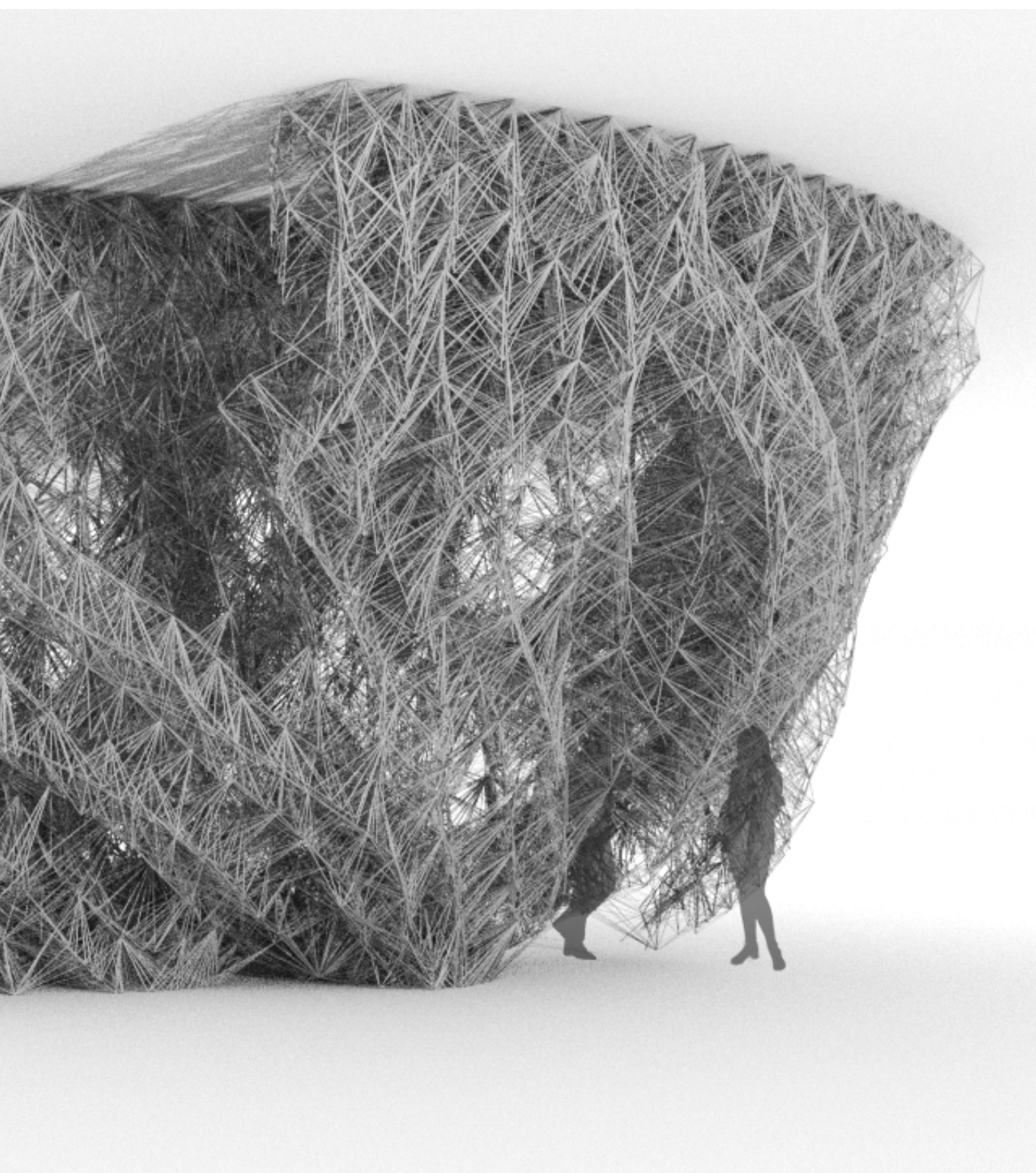
SEZIONE B-B

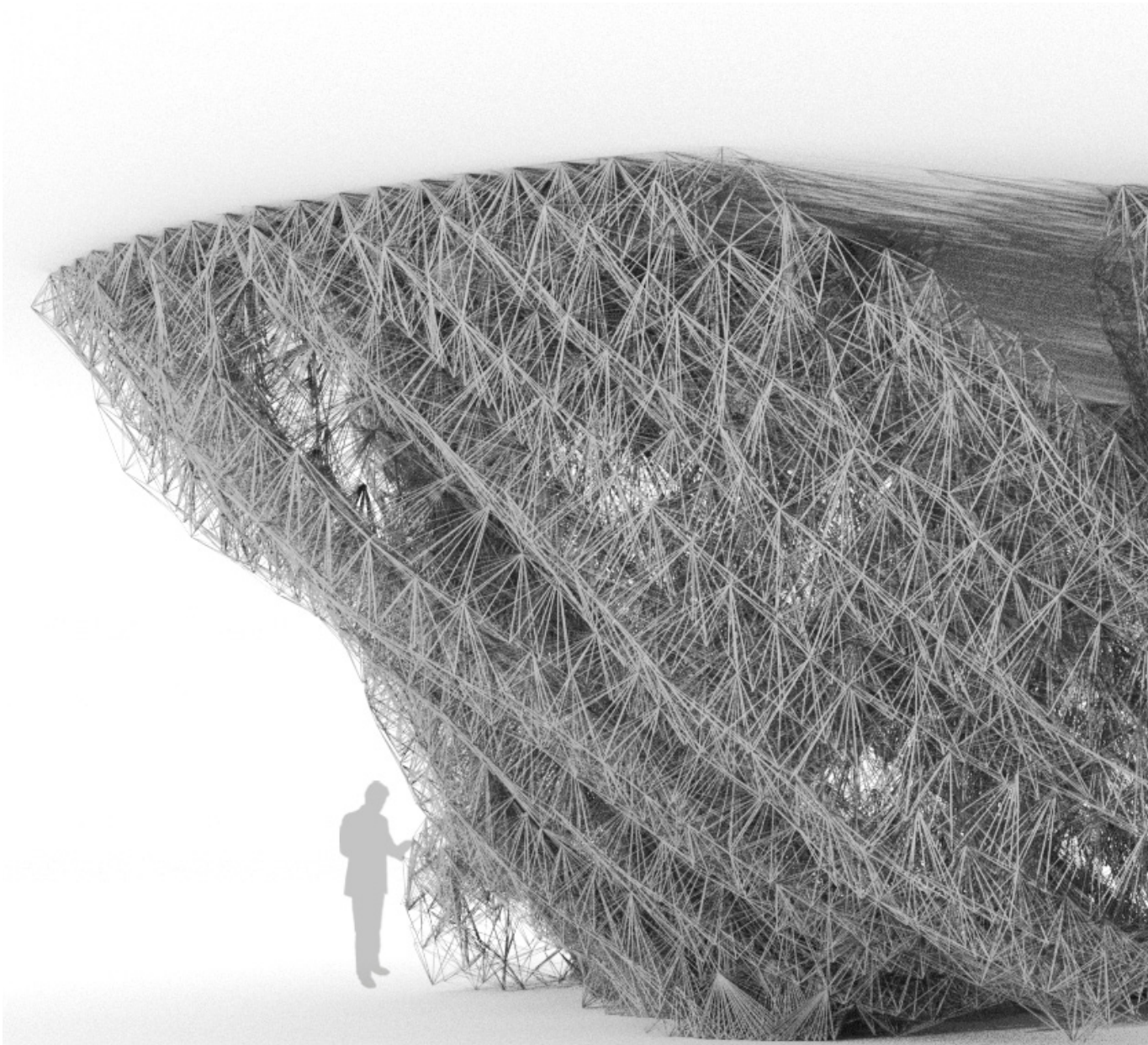


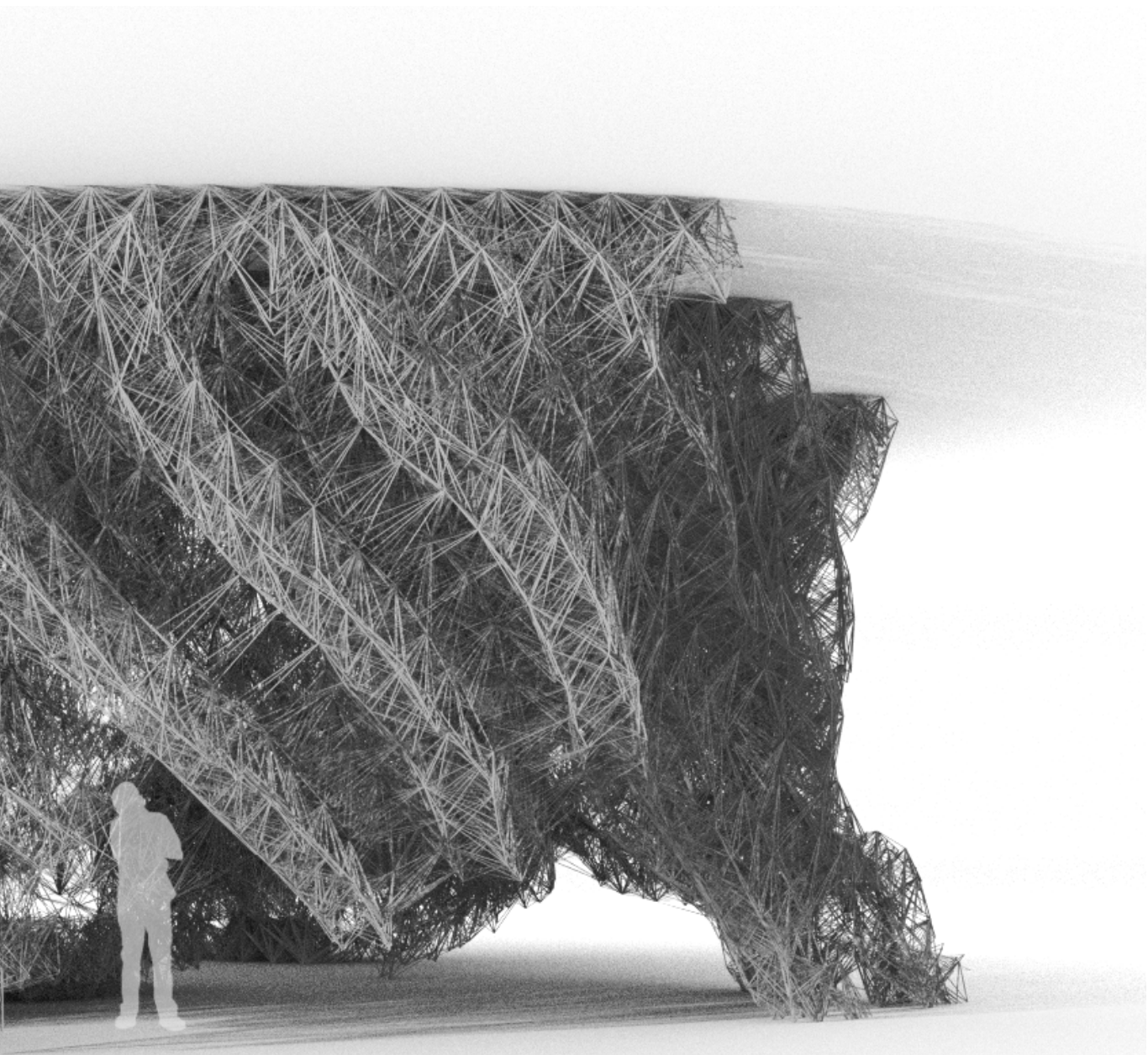
rappresentazione della relazione tra le linee generatrici e la struttura ottenuta

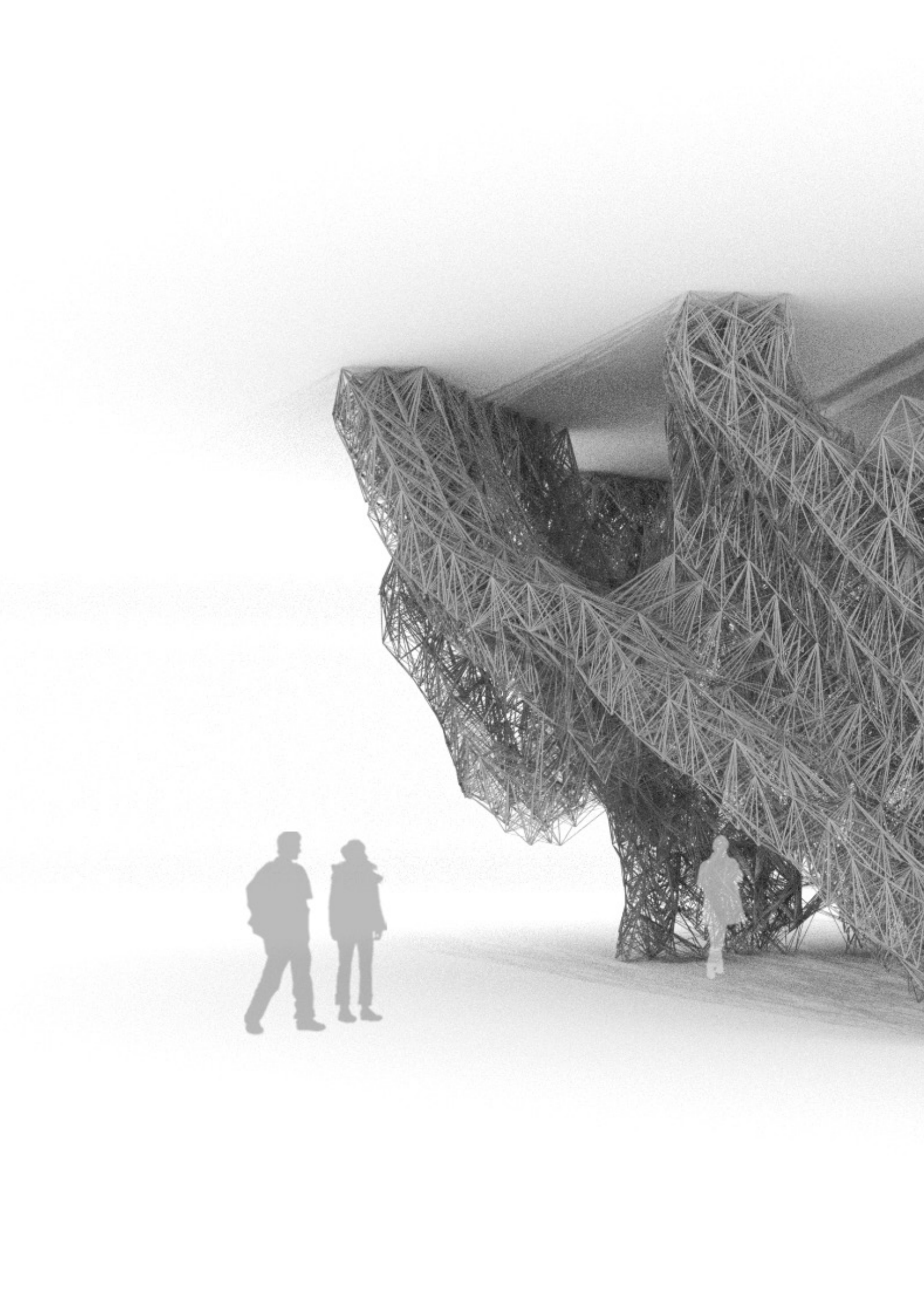
SEZIONE C-C















fabbricazione



"If you can dream it, you can do it"

Walt Disney

OBIETTIVI DELLA FABBRICAZIONE

Questa tesi si è posta due principali obiettivi riguardanti la fabbricazione (seppur non riuscendo ad affrontarli in maniera completa).

Il primo obiettivo è il superamento della separazione tra architettura ed ingegneria, o meglio, della differenziazione di significato che con il tempo hanno assunto l'arte e la scienza. Questa differenziazione rappresenta di fatto una grande limitazione in campo architettonico ma non solo. Troppo spesso infatti, quando si vuole arrivare alla costruzione di un modello, di un oggetto o di un'opera edilizia, il risultato viene raggiunto attraverso due fasi ben distinte: la prima è la fase di progettazione, in cui viene ideato e pensato il soggetto, mentre la seconda è la fase di ingegnerizzazione, in cui, in maniera più o meno ottimizzata si studiano le tecniche per realizzare l'oggetto precedentemente concepito. Questo modo di procedere e di pensare però è sintomo di un approccio non integrato ed inizia oggi ad apparire obsoleto ed in contrasto con quelli che sono i principi dell'ecologiaⁿ¹ applicati al design ed alle tecnologie di fabbricazione contemporanee. Per raggiungere tale scopo il processo di fabbricazione non è stato solo un'appendice al termine della fase progettuale, bensì ha accompagnato il processo di digitalizzazione del sistema caratterizzandolo fortemente. Fin dal principio infatti è stato chiaro quali sarebbero state le tecnologie utilizzate per la realizzazione, e durante tutta la ricerca l'ottimizzazione strutturale ha avuto un ruolo centrale, permettendo così di eseguire la prototipazione attraverso la sola riorganizzazione di tale struttura.

Secondo obiettivo fondamentale è la riduzione dei costi. Al momento nel settore delle costruzioni la voce di costo fondamentale è il lavoro manuale. Considerando quindi l'attuale diffusione di tecnologie ad alta precisione i cui prezzi stanno diventando sempre più commerciali, e la diffusione di logiche di tipo DIY (do it yourself), sembra evidente come il trasferimento di lavori ripetitivi (per i quali però è richiesta una grande precisione) a sistemi automatizzati possano essere la migliore risposta a questo obiettivo.

ⁿ¹: si noti come qui, così come avvenuto nei primi capitoli e per tutta la ricerca, il significato di ecologia sia da intendersi come l'insieme dello studio di economie, e non come la ricerca di un (fittizio) comportamento ecologico basato sulla diminuzione dei consumi (come spesso si tende a considerare in questo periodo storico).

Al fine di integrare la tecnica di fabbricazione nel processo di progettazione è necessario conoscere a fondo le tecnologie con le quali si realizzerà poi l'opera. Per fare ciò si è iniziato studiando un braccio robotico a sei assi per meglio comprenderne potenzialità, caratteristiche e limitazioni.

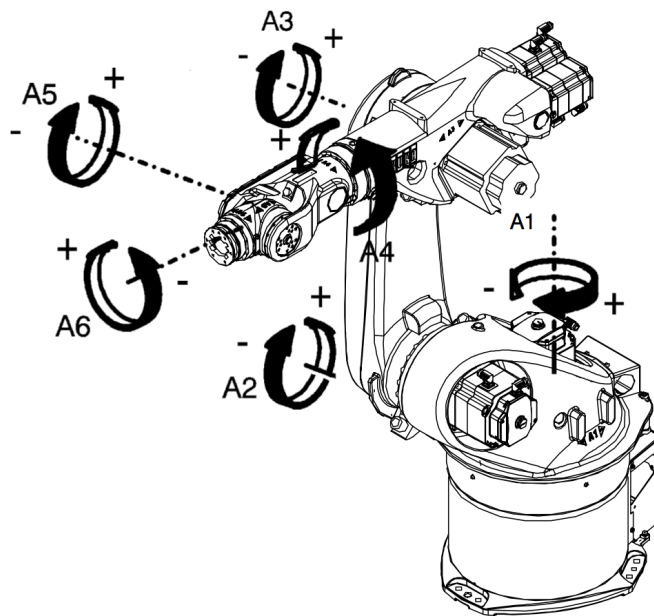
Questa tipologia di robot, ampiamente diffusa nei settori meccanici, si sta ora rapidamente diffondendo anche in campo architettonico, grazie soprattutto a numerose sperimentazioni svolte soprattutto in ambito accademico e nei settori di ricerca più avanzati (ETH, Bartlett School of Architecture, etc...).

Per meglio capirne il funzionamento bisogna iniziare dai parametri principali sui quali si può agire. I gradi di libertà (e quindi gli input necessari per comandarlo) sono le sei rotazioni attraverso le quali si individua non solo una posizione univoca nello spazio, ma anche l'orientamento con cui lo si vuole raggiungere (il punto esatto viene quindi individuato attraverso una terna di assi, e quindi un piano XY più la normale Z).

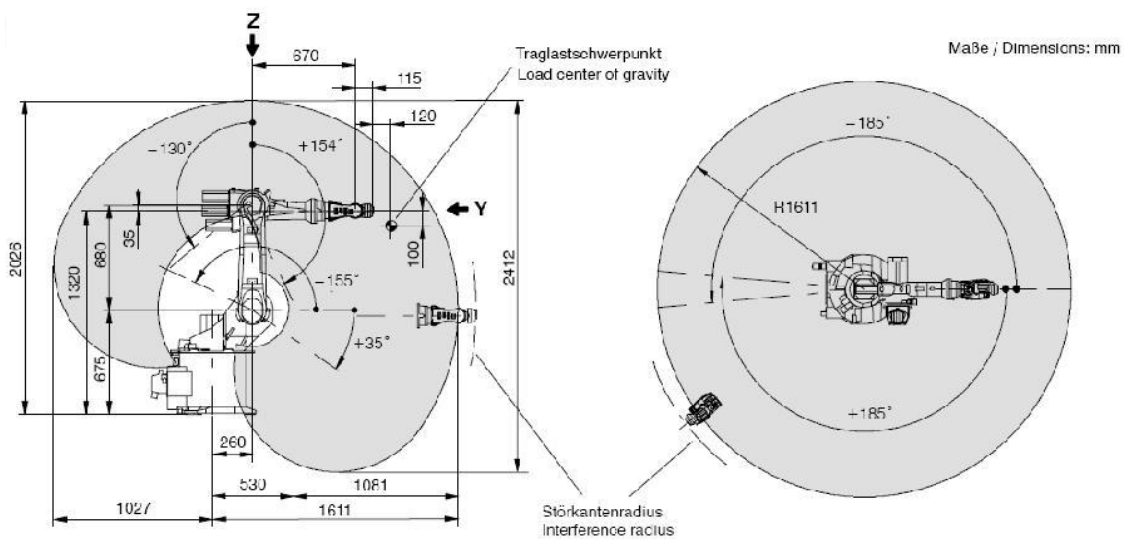
Il fulcro del funzionamento di questo robot è essenzialmente legato al linguaggio attraverso il quale si comunica con esso (gCode). Per dire al terminale di spostarsi nel generico punto A è quindi necessario individuare il piano corretto rappresentante il punto stesso e l'orientamento con cui lo si vuole raggiungere dopodiché, attraverso algoritmi di cinematica inversa è possibile ricavare le sei rotazioni che indicano univocamente al robot il punto e l'orientamento con cui raggiungerloⁿ².

ⁿ²: L'individuazione dei piani (e dei punti) necessari per trovare gli angoli è uno dei punti fondamentali per il corretto utilizzo del macchinario. In questa fase bisogna infatti prestare attenzione ad evitare criticità (meglio definite come singolarità), ovvero serie di punti che non descrivono univocamente un percorso. Ad esempio la presenza di tre punti allineati è una singolarità, perché in quel caso attraverso gli algoritmi di cinematica inversa si ricavano più possibilità di movimento tra quei punti, e non una sola.

_F1 (a lato): rappresentazione delle sei rotazioni (gradi di libertà) che è necessario comunicare al robot per indicare il punto in cui spostarsi. Il funzionamento è ispirato a quello del braccio umano; due angoli alla base (A1 e A2), come nella spalla, un angolo (A3) nel nodo equivalente al gomito e tre nella parte terminale (A4, A5 ed A6) paragonabile al polso.



_F2 (sotto): Sono rappresentate le aree (in grigio) raggiungibili dal terminale del robot. Questa limitazione è fondamentale perchè fa parte dell'anatomia della macchina, e per questo motivo deve essere considerata in ogni fase del processo. Per costruire al di fuori di questa zona è possibile tuttavia pensare di utilizzare più robot lavoranti in parallelo, oppure prevederne la possibilità di spostamento, magari lungo binari, al fine di aumentarne le possibilità costruttive.



LE COMPONENTI HARDWARE: ESTRUSORE

Avendo pensato per la fabbricazione all'utilizzo della tecnologia FDMⁿ³ è diventata necessaria una accurata fase di ricerca e di studio sull'effettore da utilizzare.

Date le limitatissime risorse economiche si sono studiati estrusori che a prezzo moderato (e possibilmente con materiale di risulta) potessero garantire comunque una buona qualità e rapidità in fase di estrusione. L'effettore diventa quindi fondamentale per la fabbricazione perchè la sua forma e le sue capacità estrusive possono incidere in maniera estremamente rilevante sul risultato finale.

I primi test sono stati effettuati pensando ad un estrusore a pellet che permette un notevole vantaggio economico e permette inoltre maggiore libertà sugli spessori che è possibile estrarre. Per questo tipo di sperimentazione ci siamo avvalsi della collaborazione con i ragazzi del gruppo "Collettivo Cocomeri", che hanno realizzato un estrusore di filamento riproducibile ed open source¹ e che ci hanno messo a disposizione la loro esperienza ed i loro materiali. Nonostante questo valido aiuto ed il fatto che le singole parti lavorassero bene, in questi test sono sorte problematiche riguardanti le componenti elettroniche necessarie per la comunicazione tra il robot e l'estrusore stesso, il cui superamento avrebbe richiesto tempi e costi non concordi con le tempistiche necessarie per questa ricerca.

La seconda fase di test, attualmente in via di sviluppo, riguarda invece l'utilizzo di un estrusore a filamento² di 3 mm (del tutto simile a quelli che si trovano sulle stampanti 3d classiche), in cui il controllo tramite gCode e l'elettronica risultano notevolmente più semplici, ma che danno meno possibilità di variazione in termini di spessore del materiale estruso.

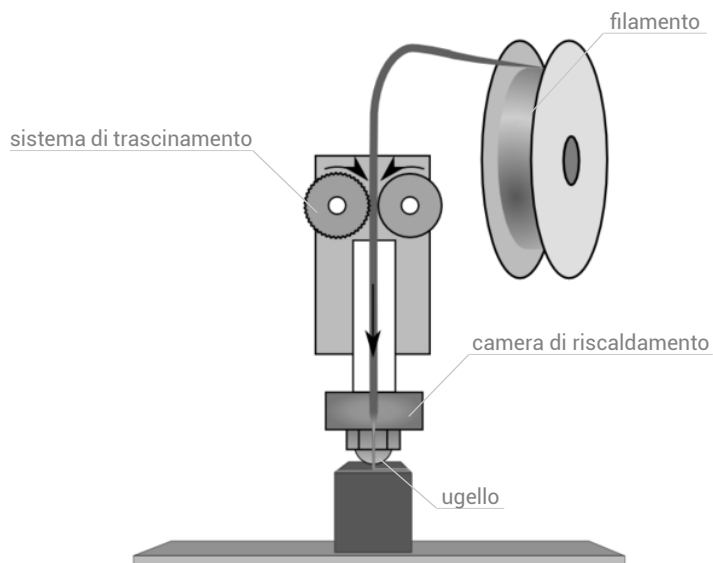
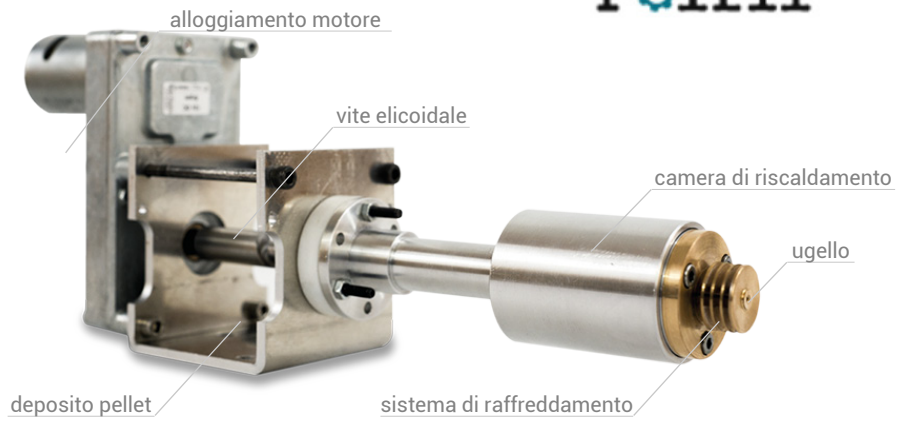
ⁿ³: Fusion Deposition Modeling. Tecnologia molto diffusa nel campo della prototipazione rapida che prevede due variazioni di stato per il materiale. Da solido a viscoso (attraverso il riscaldamento) e poi di nuovo a solido (attraverso il raffreddamento forzato o per contatto con l'aria). È una tecnologia molto dispendiosa perchè prevede il riscaldamento del materiale ad alte temperature per permetterne la fusione.

¹: www.felfil.com. Questo progetto ha visto definitivamente la luce grazie ad una campagna kickstarter andata a buon fine, che ha permesso ai ragazzi del Collettivo Cocomeri di iniziare la produzione di Felfil Evo, il cui cuore open hardware ci è stato messo a disposizione per queste prove (F3).

²: L'estrusore a filamento in questione ha le stesse componenti che si trovano nelle stampanti RepRap, ma per le quali si è prevista una redistribuzione per garantirne un ingombro minimo ed ottimizzarne la stampa in movimento (F4).

F3: componentistica base di Felfil.

Felfil



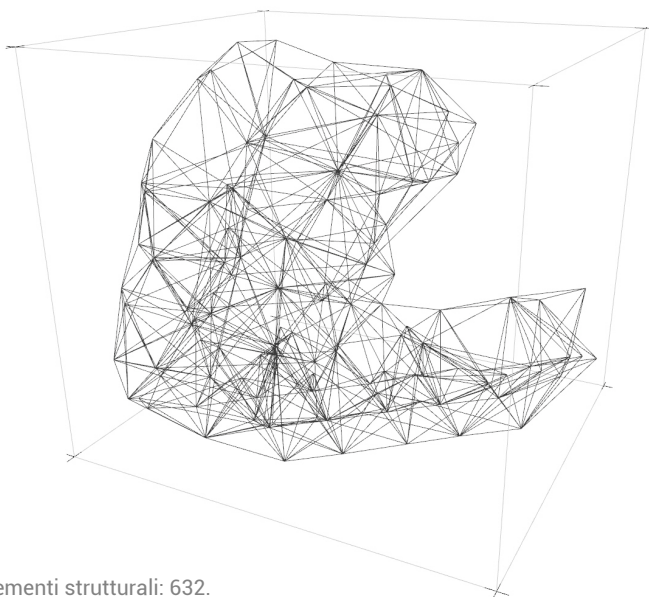
F4: componentistica estrusore a filamento.

Parallelamente allo studio su hardware e materialeⁿ⁴ si sono ipotizzati una serie di test a complessità crescente (tutt'ora in fase di studio e di realizzazione) per raccogliere le informazioni necessarie al fine di verificare la reale costruibilità del processo studiato. Per fare ciò si è resa necessaria una riorganizzazione delle aste ottenute che non inficiasse sul risultato, ma che meglio tenesse conto degli ingombri fisici, sia della struttura stessa sia dei macchinari usati per la realizzazione oltre che delle caratteristiche proprie del materiale usato (variabili queste difficili da inserire e considerare nella fase di simulazione iniziale).

Obiettivo di questa fase quindi, alla luce delle esperienze e degli approfondimenti brevemente spiegati nelle pagine precedenti, è stata la verifica e, là dove si è resa necessaria, la riorganizzazione degli elementi strutturali, di modo che essi risultassero effettivamente praticabili attraverso le tecnologie già esposte.

Questa riorganizzazione è schematizzabile attraverso alcune fasi principali (meglio approfondite nelle immagini seguenti) che possono essere definite come: il riordino delle curve a seconda della loro quota Z, la verifica di eventuali collisioni tra gli elementi strutturali o tra struttura e movimenti del robot ed in fine la gestione dei nodi strutturali e dei collegamenti tra le aste.

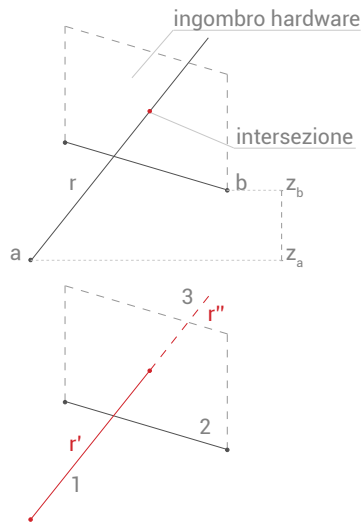
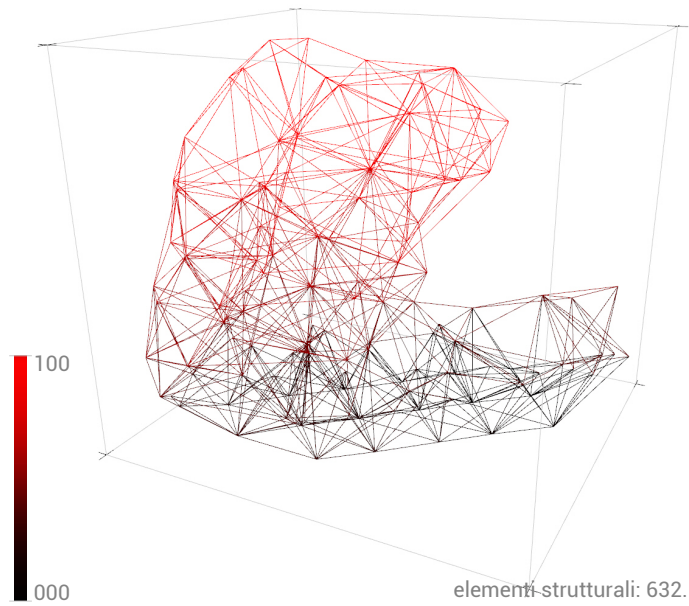
_n4: I materiali testati sono essenzialmente due. L' ABS denominato acrilonitrile-butadiene-stirene, che è un termopolimero dalle buone proprietà meccaniche e dal raffreddamento abbastanza rapido, che garantisce una buona durabilità nel tempo ma che deve essere estruso a temperature elevate (200-250 °C) e soffre molto di ritiro durante il raffreddamento. Il PLA invece (acido polilattico) è un termopolimero generato dalla fermentazione del mais, e rispetto all'ABS può essere estruso a temperature leggermente minori (180-220 °C) e soffre meno di ritiro, ma possiede caratteristiche meccaniche e di durabilità inferiori, tanto da risultare facilmente deformabile fino al completo raffreddamento.



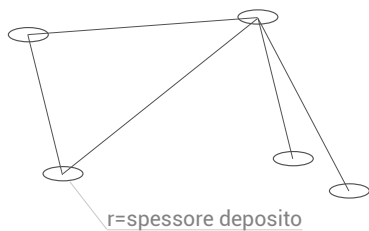
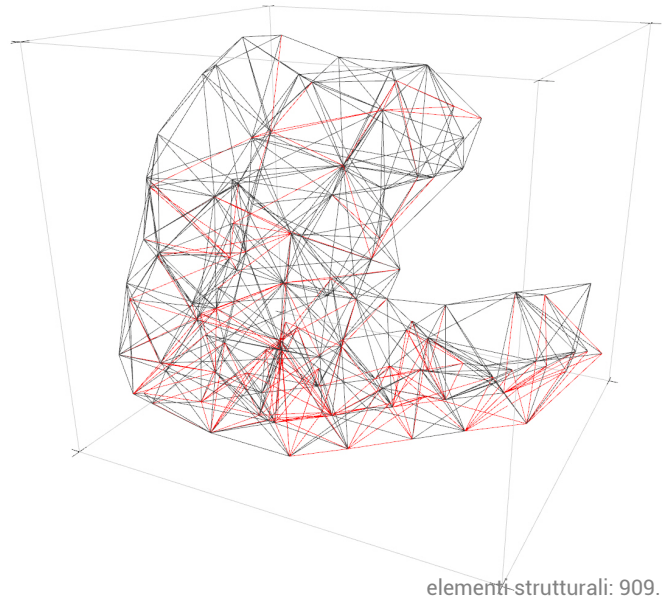
elementi strutturali: 632.

_F9: Modello teorico. Questi elementi sono il frutto del deposito degli agenti e dell'ottimizzazione strutturale derivante dalla simulazione eseguita in processing. Di fatto quindi sono già stati eliminate springs non utili, ma il livello di ridondanza è tale da garantire un buon margine di sicurezza anche nel caso in cui alcuni elementi non vengano realizzati perfettamente (a causa ad esempio di ritiro durante la fabbricazione o piccoli errori di precisione).

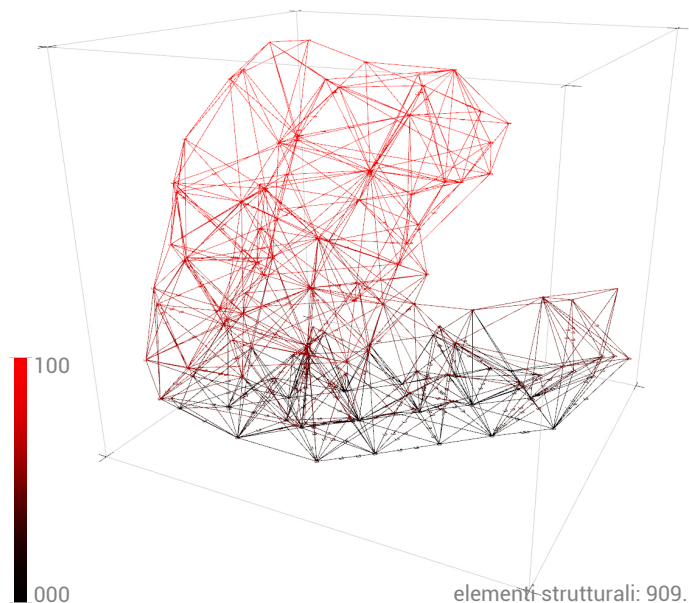
_F10: organizzazione delle curve lungo Z. Per verificare che l'ordine delle curve ne garantisca la fabbricabilità si procede al seguente riordino. Per prima cosa ad ogni asta si assegna il verso che va dal vertice più basso a quello posto più in alto. Dopodichè tutti gli elementi vengono ordinati a seconda della quota Z del loro punto iniziale. Le curve aventi il medesimo punto iniziale vengono poi ordinate in base alla quota del punto finale.



_F11: collision detection. In questa fase vengono individuati e suddivisi tutti gli elementi causanti collisioni



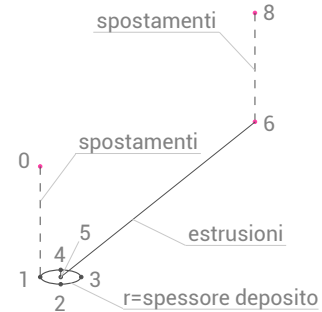
_F12: gestione dei nodi. Aumento del materiale alla base di ogni asta per garantirne la connessione con il piano di base o con gli elementi già depositati. La dimensione di questo deposito aggiuntivo è funzione dello spessore del materiale depositato.



SIMULAZIONE

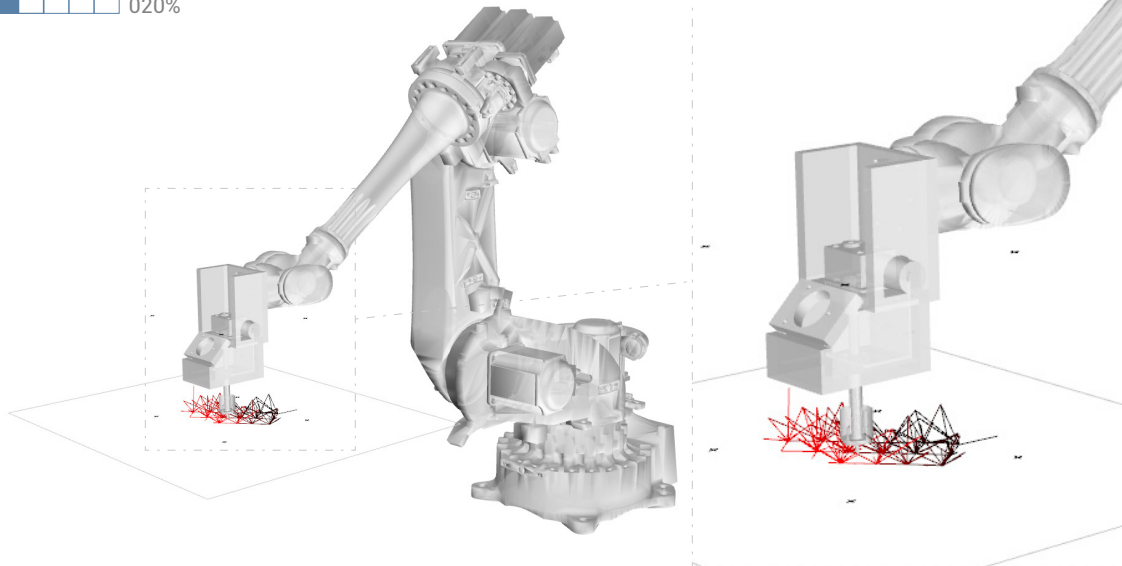
Individuate tutte le curve ed una volta stabilito l'ordine in cui debbano essere depositate, è necessario considerare anche gli spostamenti che il robot deve fare senza estrudere. Per questo motivo per evitare collisioni con il materiale già depositato dopo ogni tratto si porta il terminale ad una quota Z maggiore della massima depositata fino a quel momento. Così facendo tutti gli spostamenti avverranno ad una quota di sicurezza, senza danneggiare ciò che è stato costruito. Una volta ordinati tutti i punti è poi possibile, attraverso processi di cinematica inversa, individuare le 6 rotazioni da trasmettere al robot per eseguire una simulazione del processo e verificare che tutti i movimenti siano effettivamente eseguibili dalla macchina.

_F13: Schematizzazione dei punti (e dell'ordine con cui vengono passati al robot) necessari per la realizzazione di una singola asta.

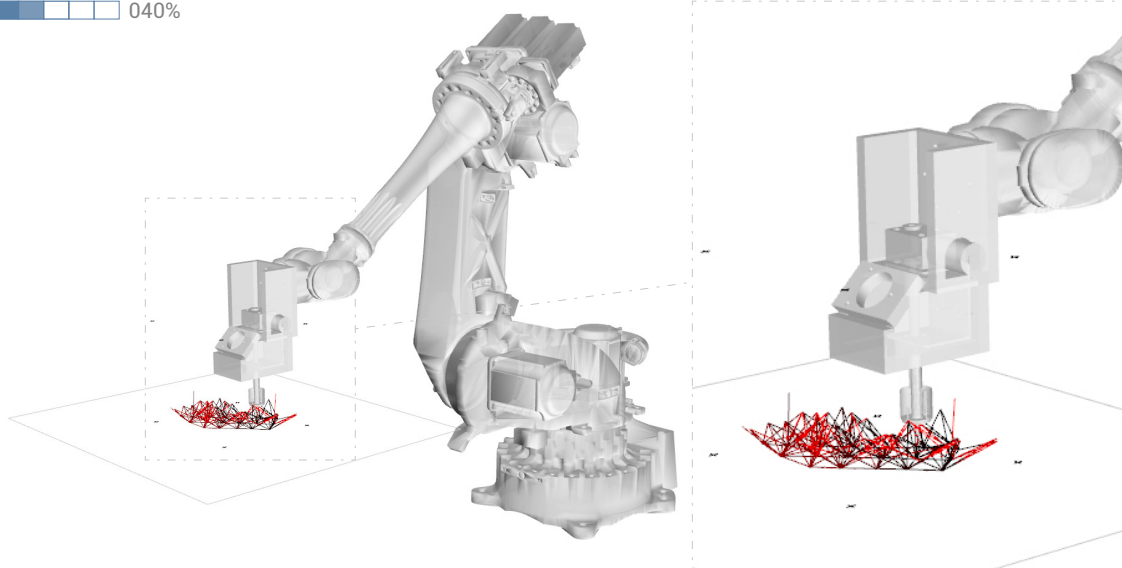


_F14-F23 (sotto e pagine seguenti): Schematizzazione delle principali fasi di realizzazione del prototipo ideato con posizione dell'estrusore e del braccio robotico.

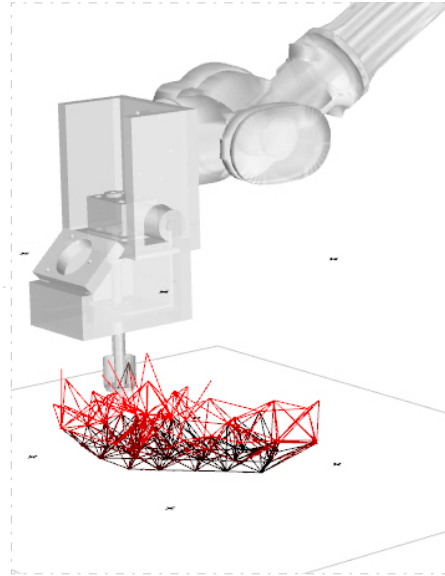
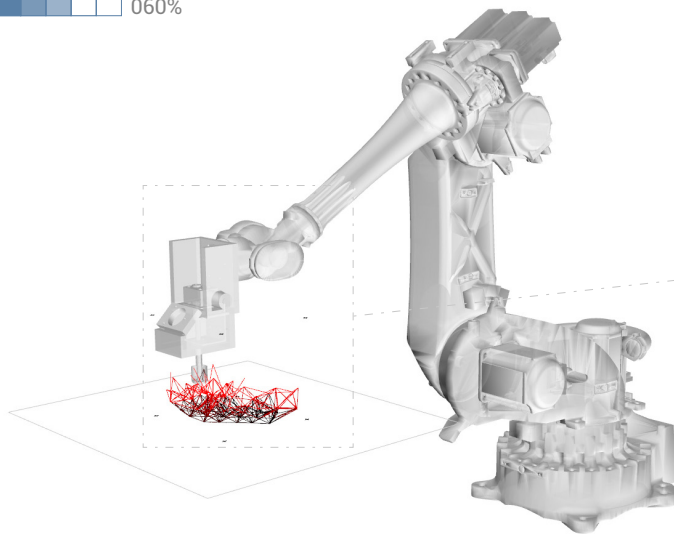
020%



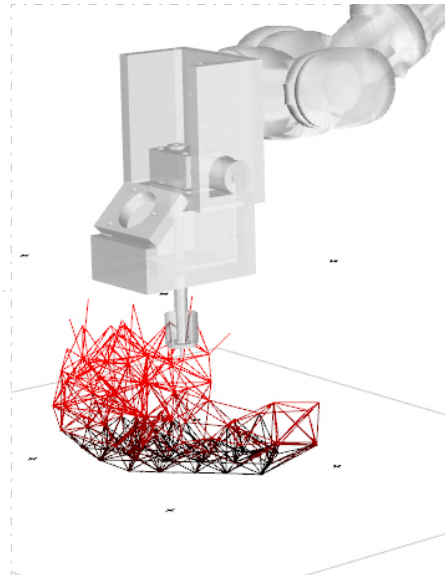
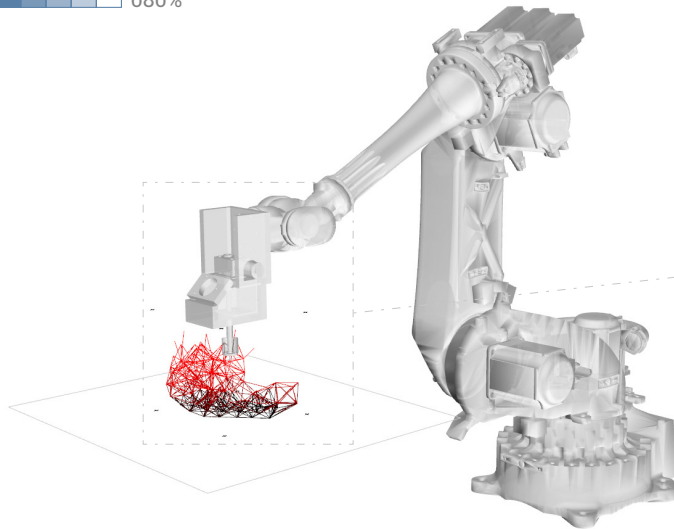
040%



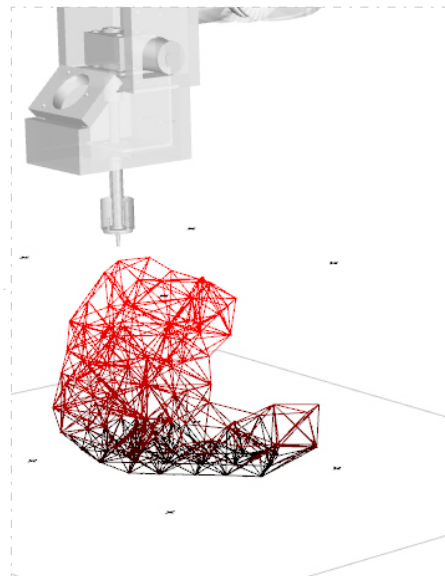
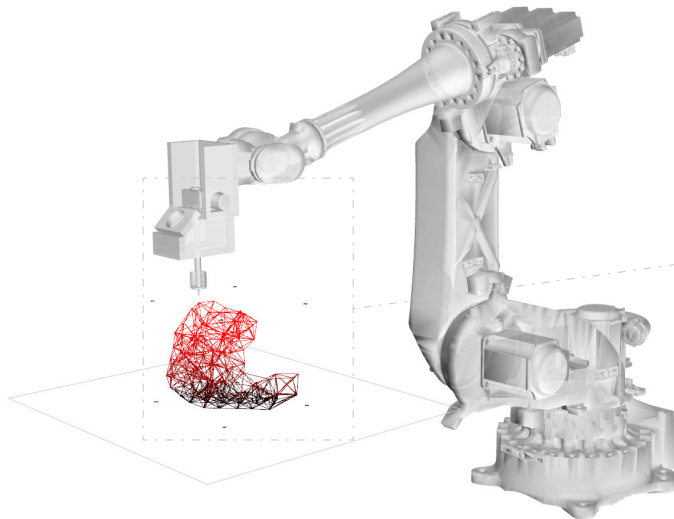
060%



080%



100%



conclusioni

Homeorhetic Assemblies è un tentativo di applicazione di tettoniche continue ed una esplorazione delle conseguenze estetiche e spaziali derivanti da esse. Costituisce un esempio di come questo tipo di tettoniche possa essere sfruttato per ottenere articolazioni spaziali complesse, attraverso l'aggregazione ad alta risoluzione (ovvero di molti elementi) ed i comportamenti propri del materiale utilizzato, il tutto coordinato dall'interazione con agenti elementari dotati di semplici regole.

Con questa ricerca quindi si è cercato di applicare a scala architettonica quelli che sono i principali comportamenti del role model analizzato, codificando i processi e le dinamiche complesse che portano alla generazione degli alveari naturali in un sistema multi agente in grado di costruire.

Il processo derivante da questi processi è un esempio di coesistenza tra due tipologie progettuali apparentemente opposte, quella di tipo bottom-up e quella più tradizionale di tipo top-down. La componente bottom-up è il nucleo principale dell'intero sistema, deriva dallo studio del sistema biologico preso ad esempio, e si manifesta attraverso l'auto-organizzazione stigmergica, la variabilità del sistema nel tempo e la sua capacità di adattamento ambientale. Le caratteristiche tipiche delle strategie top-down sono invece presenti sotto forma di condizionamento delle espressioni di auto-organizzazione, non solo tramite i setup di sistema (quindi parametri e limiti imposti) ma anche tramite l'inserimento dei vuoti e dei vincoli rispettati dagli agenti durante la simulazione.

Le strutture che emergono da questi processi possono quindi essere definite come tettoniche continue ad alta risoluzione, estremamente ridondanti da un punto di vista strutturale e caratterizzate da una notevole eterogeneità nella loro densità ed organizzazione spaziale. Mentre la ridondanza permette un grado di sicurezza strutturale superiore (proprio come avviene in molti sistemi biologici) i gradienti di densità e le variazioni distributive emergono dal processo auto-organizzativo e comportano lo sviluppo di strutture create per aggregazione (e non per semplice addizione), caratterizzate da specifiche singolarità (come ad esempio strutture simili a colonne o pareti etc...) che emergono e si fondono le une nelle altre, non apparendo così come singoli elementi discreti.

L'utilizzo di un unico materiale ed il deposito di strutture lineari, assieme alla possibilità di automatizzazione del processo costruttivo (utilizzando un robot a 6 assi data l'impossibilità di sfruttare un sistema basato sulla robotica di sciame), permetterà la realizzazione delle opere a buon mercato (limitando ad esempio i costi derivanti dall'utilizzo di materiali diversi e dalla manodopera). Dal punto di vista della prototipazione la ricerca è tutt'ora in fase di sviluppo, dato le tempistiche limitate e le difficoltà emerse nella reperibilità degli strumenti necessari per l'esecuzione di test probanti.

Con questa ricerca quindi (seppur essa sia ancora ad uno stato embrionale per quanto riguarda la prototipazione) sono stati fatti alcuni passi avanti importanti per quanto riguarda l'utilizzo di sistemi auto-organizzanti in architettura e la loro interazione con le proprietà intrinseche del materiale.

Fondamentali sviluppi futuri (e prossimi) potrebbero avvenire in due direzioni. La prima è senz'altro la fabbricazione a grande scala, realizzabile ottimizzando gli hardware già a disposizione e sfruttandoli per prototipazioni di più elementi assemblabili tra loro, o addirittura attraverso l'uso di più bracci robotici utilizzabili in parallelo.

Altro passaggio fondamentale ai fini dell'aumento di scala sarebbe poi il superamento dei limiti computazionali apparsi in questa ricerca. Nelle simulazioni realizzate infatti molti effetti emergenti erano limitati dal basso numero di agenti ed elementi strutturali simulabili in contemporanea. Queste limitazioni appaiono però, almeno in linea teorica, superabili nel prossimo futuro tramite l'ulizzo di tecnologie come il GPU comuting o il cloud computing, riguardo le quali molte sperimentazioni si stanno diffondendo proprio nel periodo in cui questa ricerca si sta concludendo.

bibliografia

LIBRI

- _M. V. BRIAN, *"Social insects: ecology and behavioural biology"*, Chapman and Hall, 1983.
- _S. CAMAZINE, JL.DENEUBORG, N.R. FRANKS, J.SNEYD, G.THERAULAZ, E. Bonabeau, *"Self-Organization in Biological Systems"*, Princeton University Press, 2003.
- _A.CONTESSI, *"Le Api: biologia, allevamento prodotti"*, Edagricole-New Business Media, 2004.
- _B.DARCHEN, R.DARCHEN, *"Il fantastico mondo delle api"*, Piccoli, 1994.
- _K. von FRISCH, O. von FRISCH, *"L'Architettura degli Animali"*, Arnoldo Mondadori Editore (1974).
- _J. R. GOULD, C. G. GOULD, *"L'architettura degli animali. Nidi, tane, alveari"*, Cortina Raffaello, 2008.
- _H. R. HEPBURN, C. W. W. PIRK, O. DUANGPHAKDEE, *"Honeybee Nests: Composition, Structure, Function"*, Springer, 2014.
- _S.JOHNSON, *"Emergence"*, scribner, 2004.
- _J. REISER, N. UMEMOTO, *"Atlas of Novel Tectonics"*, Princeton Architectural Press, 2006.
- _D.SHIFFMAN, *"The Nature of Code"*, Magic Book Project, 2012.
- _L.SPUYBROEK, *"The Architecture of Continuity: Essays and Conversation"*, Deleyva Editore, 2013.
- _J.TAUTZ, *"Il ronzio delle api"*, Springer Verlag, 2008.
- _D. A. W. THOMPSON, *"Crescita e forma"*, Bollati Boringhieri, 1992,
- _M.WEINSTOCK, *"The Architecture of Emergence"*, Wiley, 2010.

ARTICOLI SCIENTIFICI E PAPERS

-M.DE LANDA, "*a thousand year of non linear hystory*", Swerve edition, New York , 2000.

_B.R. JOHNSON, "*Pattern formation on the combs of honeybees: increasing fitness by coupling self-organization with templates* ", section of Ecology, Behaviour and Evolution, Division of Biological Sciences, University of California, San Diego, 2009.

_J. JONES, A. ADAMATZKY, "*Programmable reconfiguration of PHYSARUM machines*", Centre for Unconventional Computing, University of the West of England, Coldharbour Lane, Bristol, 2009.

_J. JONES, "*Characteristics of Pattern Formation and Evolution in Approximations of Physarum Transport Networks*", Centre for Unconventional Computing, University of the West of England, Coldharbour Lane, Bristol, 2010.

_C. W. W. PIRK, H. R. HEPBURN, S.E. RADLOFF, J. TAUTZ, "*Honeybee combs: construction through a liquid equilibrium process?*", Naturwissenschaften, 2004.

_T. D. SEELEY, R. A. MORSE, "*The nest of the honey bee (APIS MELLIFERA L.)*", Insectes Sociaux, Paris, 1976.

_V.SKARKA, J.L.DENEUBOURG, M.R. BELIC, M. LAX, "*Mathematical model of honeycomb construction* ", Journal of Mathematical Biology, 1986.

_V.SKARKA, J.L.DENEUBOURG, M.R. BELIC, "*Mathematical Model of Building Behaviour of Apis Mellifera*", Journal of Theoretical Biology, 1989.

SITOGRAFIA

- _ <http://www.apicolturaonline.it>.
- _ <http://www.processing.org/> Ben Fry and Casey Reas, Processing.
- _ <http://radical-reaction-ad.blogspot.it/> blog di Paolo Alborghetti.
- _ <http://spatial-slur.blogspot.it/> blog di Dave Reeves.
- _ http://it.wikipedia.org/wiki/Apis_mellifera.
- _ <http://it.wikipedia.org/wiki/Favo>.
- _ <http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/10/86/20130299>

VIDEO

- _ F. GRAMAZIO, M. KOHLER, "Iridescence Print", <https://vimeo.com/126252803>.
- _ I.K. ORTABASI, "*Honeybees - Natural History 2*", <https://www.youtube.com/watch?v=VsCmSWoF8PY>.

ringraziamenti

Grazie a tutta la mia famiglia, zii e cugini inclusi, che mi è sempre stata accanto nei momenti felici ed anche e soprattutto in quelli più difficili. La vita ci ha messo davanti a dure prove che abbiamo superato insieme, seppur ognuno a suo modo. Sono convinto sarà così anche in futuro.

Un ringraziamento particolare ai miei genitori, Ivano e Vanna, che mi hanno sempre sostenuto e dato fiducia permettendomi di seguire le mie passioni, e a mia sorella Barbara, per aver sempre fatto il tifo per me. Grazie anche alle due nipotine, Matilde ed Alice che portano sempre gioia e vitalità (ed un baccano che in fondo adoro).

Un sentito grazie anche alla seconda famiglia: Brego, Bud e Lollo. Siamo una balotta un pò strana, perchè ammettiamolo, un ingegnere, un macellaio, un allevatore ed un geografo sembra proprio l'inizio di una barzelletta.... ma siamo sempre noi, dopo anni.

Grazie a Paula, per i sorrisi, l'affetto, l'allegria e quel pizzico di follia, perchè sì, te l'ho sempre detto che sei un pò stramba.

Grazie ai ragazzi di Crevalcore (ne è passato di tempo da quando uscivamo in bicicletta), e grazie anche agli ex compagni di classe, Pierone e Zuc per essere sempre voi.

Grazie ad Alessio, per le dritte, la pazienza e i momenti di confronto e condivisione, ma grazie anche per le grandi occasioni di crescita personale e professionale. Penso sinceramente che il tuo lavoro vada oltre il semplice insegnamento, diventando una vera e propria trasmissione di passione ed esperienza per la materia.

Grazie a colui che si ritiene un padawan, nonostante abbia tutto il diritto di essere chiamato Jedi. Quindi grazie Paolo, per l'amicizia in primis e per il supporto nel lavoro. Che la forza sia con te!

Grazie ai ragazzi del Collettivo Cocomeri, per la disponibilità immensa. E grazie a tutti i ragazzi del FabLab di Torino, per l'ospitalità ed il lavoro fatto.

Grazie a Zompa per le dritte su processing e Blender! Sei un guru!

Grazie a tutti coloro che hanno condiviso con me il loro tempo nell'avventura parigina. Matteo, Tommaso, Alessandra, Mirko e tutti gli altri. Da ognuno ho imparato tanto.

Grazie anche a Tabe e Michele (sempre in coppia) per gli stimoli e per i vostri lavori, fonte di ispirazione.

Grazie anche a tutti gli altri tesisti anonimi, per aver condiviso con me attimi di lavoro, stress e fatica.

Infine grazie a tutte quelle persone che hanno anche solo sfiorato il mio percorso, ma da ognuno delle quali ho imparato qualcosa.

Scusate per il ritardo!

Ma ce l'ho fatta, anche se a modo mio, seguendo i miei interessi, la mia strada, non quella imposta da altri...

